

Chapitre 2. Mécanique des roches

Jaak Daemen

Conclusions principales

Le programme de l'ANDRA sur la géomécanique aborde la plupart des principales questions géomécaniques dont la résolution est nécessaire. D'excellentes recherches en laboratoire et études de modélisation ont été achevées ou sont en cours, la poursuite de ces activités doit être vivement encouragée. Un travail de qualité sur le terrain (par exemple de diaggraphie des forages) est en cours. Il ne peut cependant remplacer des investigations in situ à grande échelle.

Un problème crucial tient au fait que l'essai simulé d'un scellement de saignée dans le laboratoire souterrain risque de ne présenter qu'un intérêt marginal. Il est envisagé de procéder à cet essai très peu de temps après le creusement et après une très courte période de temps comparativement à la durée des exigences de performance, et même par rapport à la période pendant laquelle l'EDZ va réellement se développer, avant la mise en place du scellement. Ceci n'est ni convaincant ni satisfaisant. Il est difficile de comprendre comment et pourquoi l'augmentation de la composante de contrainte parallèle aux parois de la galerie réduirait la perméabilité dans cette direction ou comment un vérin plat pourrait simuler un scellement en argile gonflante, sinon de manière très rudimentaire.

Ni les essais de laboratoire, ni la modélisation, ni les essais sur le terrain envisagés sur la mécanique des roches ne semblent directement traiter des questions relatives à l'influence éventuelle de discontinuités sur divers aspects de la performance du stockage, stabilité du creusement, EDZ, déformations à long terme, réversibilité, scellement, remblai et charge des déchets mis en place, exigences de soutènement/armature. Les études in situ nécessaires prendront, au minimum, plusieurs années.

Il est important d'effectuer des recherches sur les effets des cycles de déshydratation/réhydratation dans des roches comme les argilites. Les essais de durabilité par immersion sont assez largement utilisés, particulièrement pour les siltites, et peuvent être pratiqués rapidement et à un coût modique. Ils peuvent fournir un outil de recherche efficace pour l'étude de la variabilité spatiale ainsi que de l'hétérogénéité d'une éventuelle détérioration de l'argilite. Aucun ne semble être envisagé.

L'ANDRA reconnaît que l'ancrage des scellements pourrait demander le retrait du soutènement/de l'armature, ainsi qu'un creusement supplémentaire, et que ces activités doivent être effectuées sans réactiver la zone perturbée/endommagée et, surtout, sans engendrer une propagation plus profonde de ce dommage ou de cette perturbation. On ne sait toutefois pas très bien si une attention particulière a été accordée à cette question pour déterminer si et comment cela pourrait être réalisé, notamment, étant donné qu'au moment où cette opération pourrait avoir lieu, il paraît probable que le soutènement/l'armature sera peut-être en place depuis de nombreuses années, voire des

décennies, et aura été soumis aux effets combinés de lourdes charges, de fortes contraintes, et peut-être de déformations importantes.

Les variables fondamentales décrivant l'interaction roche-support laquelle détermine l'ampleur et la gravité des éventuels dommages aux ouvrages sont bien définies. Par contre il n'est pas précisé s'il est envisagé des études in situ pour déterminer numériquement les actions à prendre pour réduire les dommages à un niveau acceptable, ou même si cette approche est réellement prise en compte dans les recherches, la conception ou la programmation du stockage.

Notre crainte que le choix, par l'ANDRA, de la résistance de la roche n'est pas conservatif est renforcée par des éléments indiquants que des dommages peuvent être initiés bien avant que la résistance maximale soit atteinte et que la résistance à de faibles taux de charges apparaît inférieure, d'une façon mesurable, à ce qu'elle est pour des taux de charge plus élevés. Le choix de valeurs de dimensionnement éventuellement non conservatrices pour la résistance est particulièrement troublant au vu des exigences de stabilité à long terme pour cette structure et du besoin reconnu de réduire au maximum l'ampleur de l'EDZ, et l'intensité des dommages quelconques dont elle pourrait souffrir. On suppose que les observations in situ approfondies envisagées dans le laboratoire souterrain permettront une meilleure estimation de ce que seraient les « meilleures » paramètres réels, et seront utilisées pour de tels exercices d'étalonnage.

Recommandations

Compréhension approfondie de l'EDZ : Il est important de mettre en œuvre tous les moyens possibles pour arriver à une compréhension approfondie de l'EDZ, de son comportement et de ses caractéristiques, notamment de son évolution dans le temps. Il serait très souhaitable que l'ANDRA s'engage sur un programme prolongé d'essais géomécaniques in situ.

Compréhension in situ et essai de scellement : Il semblerait plus pertinent d'essayer d'abord de développer une connaissance in situ plus réaliste de l'EDZ, de ses propriétés et de ses caractéristiques, avant de concevoir un système de scellement. Il est essentiel qu'un véritable essai de scellement soit effectué in situ, en utilisant les technologies et les matériaux qui sont réellement prévus pour la fermeture finale de l'installation de stockage.

Recherche approfondie sur les scellements : Un programme approfondi et réaliste de recherche in situ sur les scellements devrait comporter des recherches sur la façon de procéder avec l'EDZ, de mettre en place les scellements et de les tester. Il serait très souhaitable qu'un tel programme comporte un volet plus complet et détaillé sur l'influence des pratiques de construction sur le développement et les caractéristiques de l'EDZ. Des investigations complémentaires pourraient comporter une recherche sur les conséquences du retrait du soutènement/de l'armature, sur une éventuelle réactivation de la propagation de l'EDZ, et sur les technologies qui pourraient être utilisées pour réduire

au minimum ou prévenir une telle réactivation. Dans l'idéal, une telle recherche devrait être menée dans un emplacement où le soutènement et l'EDZ ont subi les mêmes effets conjugués de charges mécaniques, thermiques, hydrologiques et chimiques (par exemple, à l'endroit où un essai avec éléments chauffants à l'échelle d'une alvéole a été effectué). Ces types d'essais nécessiteraient un engagement minimum de plusieurs années.

Echelle spatiale des essais : Etant donné la variabilité et l'hétérogénéité intrinsèques de la plupart des masses rocheuses, et certainement de celles qui sont stratifiées, les essais doivent être pratiqués à une échelle spatiale permettant de prendre en compte un volume de masse rocheuse raisonnablement représentatif et sur une durée suffisamment longue pour que le facteur temporel du comportement soit correctement intégré. Cet exercice devrait comprendre des essais et une modélisation plus explicite des propriétés et du comportement des discontinuités, par exemple des plans de stratification et des diaclases dans la roche hôte.

Mont Terri et Bure : Il serait extrêmement souhaitable que l'ANDRA démontre plus formellement une éventuelle analogie entre Mont Terri et Bure.

Impact des pratiques de construction des ouvrages : L'ANDRA devrait prendre en compte plus explicitement l'impact des pratiques de construction sur la performance de la sûreté du stockage, et envisager des recherches sur les choix de méthodes de construction dans le laboratoire souterrain, probablement après 2005. Il serait préférable d'essayer de réduire au minimum des dommages de ce type par des contrôles de la construction.

Confiance statistique dans les essais de laboratoires dans certains domaines : Pour certains types d'essais en laboratoire le nombre d'essais effectués pourrait être trop limité pour avoir une signification statistique. Nous recommandons que des essais supplémentaires des types entrant dans cette catégorie soient effectués aussitôt que possible, c'est-à-dire aussitôt que des spécimens peuvent être obtenus à partir des puits et/ou de la niche.

Perte de résistance à des températures élevées : Bien que les résultats soient très loin d'être clairs, il semble que si l'argilite est exposée à des températures situées entre 80 et 100 °C il s'ensuit une perte de résistance. Une telle possibilité est plus que suffisante pour justifier des recherches plus approfondies. De ce point de vue des essais in situ avec des forages munis d'éléments chauffants sont vivement recommandés.

2.1 Introduction

Ce chapitre examine l'état actuel du programme de recherche de l'ANDRA sur la mécanique des roches visant à étudier la faisabilité d'un stockage sûr en couche géologique profonde pour les déchets radioactifs dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien du site de Bure. Mise à part une visite aux alentours du site et sur le site même, cet examen se fonde principalement sur une consultation de la littérature scientifique. La

visite géologique, guidée par Messieurs Mourot et Kossura, s'est montrée particulièrement instructive. Elle nous a donné une perspective des aspects régionaux de la géologie et tout particulièrement de la structure géologique du secteur. Nous avons ainsi pu avoir une meilleure compréhension de la disposition des formations sédimentaires et, surtout, des aspects structurels dominants et des failles.

La visite du laboratoire du site de Bure s'est montrée très utile pour mieux comprendre la disposition des installations et les travaux achevés, en cours et prévus. La possibilité d'examiner des diagraphies détaillées des forages, ainsi que la méthode choisie pour les diagraphies des puits et certains essais en laboratoire se sont avérées instructives. Par contre nous avons regretté de n'avoir eu qu'un accès limité aux carottes des forages. La visualisation des déblais provenant du fonçage du puits n'a été que d'un intérêt limité étant donné que le fonçage du puits n'avait pas encore atteint la couche callovo-oxfordienne.

Comme la littérature concernée est très volumineuse, et que certains documents sont difficilement accessibles ou ne sont tout simplement pas disponibles, et que de plus les délais impartis à cette étude sont limités, il est probable que cette analyse de la documentation sera loin d'être complète et n'arrivera pas au degré de précision qui aurait été souhaitable. Par conséquent cette analyse critique pourra comporter des lacunes.

2.2 Exigences réglementaires

La règle N° III.2.f¹ identifie un certain nombre de questions se rapportant à la mécanique des roches qui doivent être abordées. Plusieurs d'entre elles sont traitées du point de vue technique dans les sections ci-dessous ;

La section 2.3, *Le système de confinement*, inclut dans la partie *les barrières ouvragées* «... des matériaux de rebouchages des cavités de stockage et des forages, de remblayages des galeries et de scellement des puits d'accès. »

La section 3.1, *Objectif*, confirme que “Les caractéristiques du site retenu, ... la conception des barrières artificielles (colis, barrières ouvragées) et la qualité de leur réalisation constituent le fondement de la sûreté du stockage. »

La section 4.1, *Remarques préliminaires*, indique que “Le site et les barrières artificielles de confinement devront jouer un double rôle:

- protéger les déchets en s'opposant à la fois aux circulations de l'eau au contact des déchets et aux actions humaines intrusives;
- limiter et retarder, pendant le délai nécessaire à une décroissance radioactive suffisante des radionucléides concernés, le transfert vers la biosphère des substances radioactives éventuellement relâchées par les déchets.

¹ Règle N° III.2.f

... à long terme et après décroissance d'une partie importante de la radioactivité contenue dans les déchets, la barrière géologique et les matériaux de scellement des puits devront pouvoir assurer à eux seuls le confinement."

La section 4.3, *Les barrières ouvragées*, stipule que

"Après remplissage des ouvrages, les vides créés lors de la réalisation du stockage devront être comblés pour rétablir autant que possible l'étanchéité du milieu et éviter que les ouvrages ne constituent des drains préférentiels pour les eaux souterraines et, le cas échéant, pour éviter des tassements préjudiciables aux couches géologiques surmontant la formation d'accueil. Les dispositions prévues à cet égard devront être précisées et justifiées. Par ailleurs, les forages de reconnaissance devront être efficacement scellés dès qu'ils ne seront plus utiles pour la connaissance ou la surveillance du site."

De plus, dans cette section, la règle spécifie et donne des détails sur les types de matériaux de remblayage, leurs fonctions et les exigences de comportement que chaque type doit satisfaire. L'accent est particulièrement mis sur les matériaux de remblayage et de scellement pour les puits d'accès pour répondre au besoin d'assurer une qualité et une longévité compatibles avec le rôle qui leur est assigné dans le système des barrières, compte tenu de la décroissance de la radioactivité des déchets au fil des années. Dans cette section la règle identifie aussi clairement le potentiel de cicatrisation, tout particulièrement dans les roches sédimentaires, et la nécessité de l'étudier.

La constructibilité, ou la faisabilité du développement d'un site de stockage sont abordées dans la section 4.4.2 de la règle, Critères importants, où apparaît l'exigence que la construction du site de stockage ne doit pas altérer significativement la barrière géologique. De plus, les alvéoles de stockage doivent se trouver dans un milieu qui ne nécessitera pas un agrandissement (une excavation supplémentaire) pour accueillir les déchets à stocker. Cette section de la règle exige également très clairement que :

« Des études, notamment à l'aide d'une amélioration couplée des phénomènes thermiques et mécaniques, devront être effectuées pour étudier l'influence du mode et des séquences de mise en place des déchets sur les effets mécaniques dans le stockage et en particulier du temps de refroidissement préalable et de la densité du stockage des déchets.»

La section 4.5, *Le concept de stockage*, exige que les perturbations causées par les travaux d'excavation soient réduites au maximum. La conception et la construction des puits d'accès devraient permettre, d'une part, de minimiser tout risque de circulation d'eau et, d'autre part, de prendre en compte l'objectif d'un scellement effectif une fois les opérations terminées.

La section 5.1 de la règle stipule "Afin de vérifier que les objectifs de conception du stockage sont atteints, l'évaluation de la sûreté post-fermeture devra porter sur les trois aspects complémentaires suivants :

- justification du caractère favorable des performances de chacune des barrières de confinement, ...
- évaluation des perturbations apportées par la création du stockage et vérification que ces perturbations restent acceptables vis-à-vis du niveau de qualité choisi pour chacune des barrières, en particulier de la barrière géologique; on considérera notamment les perturbations liées au creusement du stockage, et aux effets thermiques, thermomécaniques et hydrogéologiques associées à la charge thermique des colis ainsi que les modifications éventuelles des écoulements et des caractéristiques chimiques de la formation géologique,
- ..."

Bien que la Section 5.3. *Situations prises en compte* semble porter principalement sur la barrière géologique, le texte est suffisamment général pour être interprété comme exigeant la modélisation des barrières ouvragées c'est-à-dire notamment le remblaiement et le scellement à divers moments spécifiés après la mise en place et la fermeture. A l'appui de l'analyse de sûreté, elle demande une modélisation et une caractérisation indiquant que les connaissances sur les barrières ouvragées devront certainement être suffisantes et adéquates pour permettre ces modélisations et caractérisations.

La situation de référence décrite dans la section 5.3.1 précise que "Les événements à considérer sont:

- les événements liés à la présence du stockage: l'impact de ce dernier se traduira par la mise en jeu de processus associés à l'émission de chaleur, à des modifications mécaniques, physico-chimiques ou encore à la désaturation du milieu naturel autour du stockage. L'ensemble des processus de dégradation progressive des barrières artificielles (corrosion des conteneurs et des matrices de confinement, vieillissement des barrières ouvragées et des scellements...) devra être considéré;
- »

La section 5.4 *Modélisation*, identifie des sous-systèmes ayant besoin d'être modélisés, ainsi que les exigences de modélisation. Du point de vue de la mécanique des roches « le champ proche, qui comprend les colis, les matériaux de remplissage des cavités, des galeries et des puits (barrières ouvragées) et la partie de la barrière géologique directement affectée par le stockage de déchets. » est particulièrement important.

Section 6, *Assurance de la qualité*, exige de façon explicite que la conception des barrières ouvragées soit conforme aux impératifs de l'assurance qualité et prenne en compte le rôle qui leur sera assigné dans la performance du confinement.

La section 1.1 de l'Annexe N° 1 stipule, dans la section 1, *Investigations à mener en surface*, que

1.1. « *Les objectifs fondamentaux doivent être, pour chaque site, de:*

- déterminer en premier lieu ses caractéristiques lithologiques, structurales, pétrographiques, hydrogéologiques, géomécaniques, géochimiques et tectoniques

- afin en particulier de le situer par rapport aux critères de choix de site (chapitre 4.4);
- rassembler les éléments contribuant à la modélisation du site en vue de l'évaluation de sa sûreté.

Ces objectifs pourront être atteints de façon complémentaire par des investigations de surface, des forages de reconnaissance, et par l'étude des matériaux extraits de ces forages (eau, gaz et roche). »

La section 1.3 de l'Annexe N° 1 demande que, aussitôt la formation atteinte, tous les efforts soient faits pour déterminer in situ les propriétés mécaniques et l'état de contrainte naturel de la roche en vue de s'assurer que l'information nécessaire est obtenue pour prévoir le comportement hydro-thermomécanique.

La section 1.4 de l'Annexe N°1 *Etude des matériaux extraits des forages* précise que:

« Il sera nécessaire de caractériser les roches de la barrière géologique à partir des échantillons prélevés sur les carottes de forage, du point de vue minéralogique, chimique, physique et mécanique. Une attention particulière sera portée aux paramètres mécaniques de l'argile et du sel. Pour l'ensemble des milieux, devront être mesurés dans le cadre du programme de reconnaissance:

- les paramètres mécaniques (résistance, déformabilité, viscosité)
- [...]

L'anisotropie de ces paramètres sera évaluée.

[...]

Des expériences conduites sur échantillons permettront également dès ce stade de mettre en évidence certains effets couplés (thermiques, mécaniques et hydrauliques) et d'évaluer les coefficients d'échange entre les fluides et les phases minérales du système. »

La Section 2.1 de l'Annexe N°1 énumère les investigations à mener dans le laboratoire souterrain. Elle impose que la roche soit testée de manière à ce que ce test la perturbe le moins possible tout en tenant compte des phénomènes naturels et des changements induits par la construction du site de stockage. Cette section demande que les objectifs du laboratoire souterrain comportent la détermination des méthodes de creusement, de rebouchage et de scellement des cavités.

La Section 2.2, *Mesures in situ et sur les échantillons*, de l'Annexe N° 1, indique que

« Des mesures devront être effectuées pour confirmer ou préciser les valeurs des paramètres et pour apprécier leur anisotropie, leur distribution spatiale, ainsi que les effets d'échelle.

Parmi les investigations à mener, il conviendra:

- d'évaluer le tenseur des contraintes initiales;
- d'apprécier à partir des cavités creusées dans le laboratoire souterrain la forabilité de la roche ainsi que son comportement en parois (risque d'écaillage pour les roches dures, convergence pour les roches plastiques);
- de mesurer les effets mécaniques différés (relaxation, fluage) »

La Section 3 de l'Annexe N°1 de la Règle spécifie l'instrumentation qu'il faudra mettre en place en vue de surveiller l'évolution du site pendant la période de mise en place des déchets. Il faudra surveiller les déplacements et, plus généralement, le comportement des parois des excavations qui devront rester ouvertes sur une longue durée (certains forages de reconnaissance, les puits d'accès, les galeries de service) ;

La section 4.3 de l'Annexe N°1 énumère plus particulièrement les exigences pour les sites argileux pour lesquels il est important de déterminer la nature et l'importance des hétérogénéités géotechniques au sein de la formation hôte.

L'Annexe N° 2 identifie la sélection des situations qui doivent être évaluées dans le cadre de l'analyse de sûreté dont, dans la Section 1, la situation de référence : « Les événements liés à la présence du stockage : l'impact de ce dernier se traduira par la mise en jeu de processus associés à l'émission de chaleur, à des modifications mécaniques, physico-chimiques ou encore à la désaturation du milieu naturel autour du stockage. L'ensemble des processus de dégradation progressive des barrières artificielles (corrosion des conteneurs et des matrices de confinement, vieillissement des barrières ouvragées et des scellements...) devra être considéré. »

La section 1.1 de l'Annexe N° 2 *Situation évolutive du système due à la présence du stockage*, spécifie :

« Les effets des travaux de creusement des cavités de stockage sur les propriétés hydrauliques de la roche et l'influence des effets transitoires autour des ouvrages sur le comportement hydraulique seront appréciés.

En ce qui concerne le dégagement thermique des déchets C, il faudra évaluer:

- les déformations et les contraintes induites par les effets thermomécaniques sur la formation hôte;
- les conséquences de l'ensemble des effets ci-dessus sur les formations sus-jacentes, pour les sites argileux et salifères. ...
- pour un site argileux:
 - l'importance des phénomènes de déshydratation des minéraux argileux en fonction de la température et de la distance au stockage; »

2.3 Les questions techniques

Les principales questions techniques de la mécanique des roches associées au stockage des matériaux radioactifs sont

- la réversibilité (proche de la "retrievability" [récupérabilité]), un concept souvent utilisé dans les autres programmes de gestion des déchets nucléaires.
- la stabilité à long terme de la zone de stockage et des excavations d'accès,
- la zone perturbée par l'excavation (EDZ),
- les problèmes de constructibilité et
- les impacts des travaux de construction sur la performance du site de stockage, le comportement de la mécanique des roches.

La prise en compte du dernier point est une question complexe qui comporte de nombreux aspects. De manière générale, il englobe l'analyse du comportement thermo-hydro-chimio-mécanique de la zone excavée à court et long termes. Plus précisément, l'état de contraintes dans le massif rocheux non perturbé et les changements de contraintes induits par les travaux de construction, notamment les effets de la mise en place des matériaux radioactifs, doivent faire partie de cette analyse. Les efforts de modélisation comprennent la prise en compte de l'influence des effets thermiques, hydrologiques, et chimiques sur le comportement mécanique et le scellement des voies d'accès

2.3.1 Réversibilité

Les aspects légaux, sociaux et techniques de la réversibilité sont discutés de façon très claire par la CNE.² La "retrievability", une approche très voisine, est une exigence absolue de certains programmes de gestion des déchets nucléaires.³ Cependant, il n'existe aucune unanimité sur la désirabilité de la "retrievability" comme le montrent les recommandations récemment émises par le comité chargé des critères pour la sélection d'un site de stockage en Allemagne. Ce comité reconnaît que des conflits intrinsèques peuvent exister entre l'exigence de "retrievability" et le confinement ultime des déchets.⁴ Bien que la Suède ne soit pas explicitement tenue par la loi de maintenir l'option de reprendre les déchets, le sujet a été étudié de façon approfondie.⁵ Le maintien de la réversibilité et/ou de la "retrievability" a des implications pour de nombreux aspects de la performance du site de stockage.⁶ De nombreux autres sujets abordés ici, notamment le comportement mécanique des roches au fil des années, la stabilité du creusement, la surveillance in situ et la modélisation, jouent un rôle essentiel dans la démonstration de la réversibilité.

² CNE « réversibilité », 1998

³ Par exemple pour le programme américain, Boyle et Rowe, 1998, Section 8.5

⁴ AkEnd, 2002, Section 2.1.7

⁵ Par exemple. SKB, 2001, Section 14.5.6, Kalbantner et Sjöblom, 2000

⁶ Un résumé, très instructif, sur la différence entre réversibilité et "retrievability" est présenté dans le rapport CNE, 2001, pp.109-10

2.3.2 La stabilité à long terme du creusement

Généralement, la stabilité à long terme des creusements souterrains dans lesquels les matériaux radioactifs sont stockés et celle des creusements qui permettent d'y accéder sont considérées comme souhaitable. (Les sites de stockage dans le sel font exception. Dans ce cas, la fermeture progressive des cavités encapsulant étroitement les matériaux dans une roche hôte presque imperméable est considérée comme un avantage.) La stabilité à long terme est souhaitable puisqu'elle :

- facilite le maintien de l'option de réversibilité
- réduit les charges sur les matériaux stockés (et par conséquent réduit le risque de corrosion des conteneurs et/ou des surconteneurs),
- réduit la taille de la zone perturbée, et le risque associé aux mouvements d'eaux favorisés au travers de ces zones, et
- facilite la conception et la mise en place des scellements permanents.

Dans les approches techniques conventionnelles quelques peu simplifiées sur la stabilité du creusement souterrain, la stabilité à long terme est souvent traitée en termes de temps de stabilité sans soutènement.⁷ Cette approche est peut être acceptable pour les ouvrages d'ingénierie de routine, néanmoins elle reste entachée d'un grand nombre d'incertitudes. Pour toute extrapolation, même légèrement au-delà des pratiques courantes d'ingénierie (au delà de 50 à 100 ans ?), elle doit être considérée comme très problématique.

Dans le contexte des sites de stockage de déchets nucléaires, il est probablement important d'insister sur le fait que le terme "stabilité à long terme", peut avoir plusieurs sens. Il a par exemple été utilisé pour décrire l'absence d'instabilités sismiques affectant l'ensemble de la masse rocheuse à grande échelle,⁸ plutôt que comme un terme se rapportant spécifiquement, principalement, ou exclusivement aux excavations souterraines. Dans le contexte de cette évaluation du programme d'études et de recherches de l'ANDRA, ce chapitre ne traite que de la stabilité des excavations souterraines.

2.3.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)

Il est clairement reconnu que les excavations produisent une zone perturbée ou endommagée. Cette zone entoure de manière générale les cavités et s'étend à une certaine profondeur dans la masse de la roche à proximité. Au niveau le plus élémentaire et le moins préjudiciable une telle perturbation peut consister purement et simplement en une redistribution des contraintes autour de l'excavation.⁹ Il arrive souvent que la redistribution des contraintes dépasse la résistance de la roche. Dans ces conditions la

⁷ Par exemple Hoek et Brown, 1980, pp 25, 289 ; Fairhurst, 1999, p. 17

⁸ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, section 1.5 : Stabilité Géologique

⁹ Par exemple Hoek et Brown, 1980, p. 87, p. 101 et après ; Hoek et al., 1995, p. 66

roche autour des cavités, n'absorbe plus les contraintes et se fracture. La « fracturation » autour des excavations est un phénomène complexe, pouvant se traduire par la création de fractures fraîches dans la roche intacte, ainsi que le glissement et/ou l'ouverture de plans fragiles préexistants, par exemple des plans de stratification et/ou des diaclases. Une des difficultés majeures pour le confinement souterrain des matériaux radioactifs tient au fait que la zone perturbée autour des excavations, en particulier en situation de dépassement de la résistance, pourrait entraîner le développement de voies d'écoulement préférentielles, par exemple parallèles aux excavations, et pourrait rendre le scellement des excavations plus difficile.

L'importance attribuée à la zone perturbée dans les programmes de gestion des déchets nucléaires est soulignée par le fait que de nombreux programmes ont consacré une recherche approfondie à ce sujet.¹⁰ De Marsily et al.¹¹ sont parmi les nombreux auteurs qui ont attiré l'attention sur l'importance de la zone perturbée qui pourrait éventuellement jouer un rôle de court-circuit pour l'écoulement.

L'ANDRA elle-même a pleinement reconnu l'importance de l'EDZ pour diverses raisons, en particulier vis-à-vis de la sûreté d'ensemble du site de stockage (confinement, isolation), et projette de traiter en détail les incertitudes relatives à l'EDZ, par la modélisation et en particulier par des études in situ approfondies.¹² La Commission nationale d'évaluation est très claire sur la grande importance qu'elle attache à la question de l'EDZ.¹³ Nous partageons cet avis; c'est une des principales questions soulevées par notre examen du programme de recherche de l'ANDRA.

L'ANDRA a obtenu des informations considérables sur le potentiel du développement de l'EDZ à partir d'informations recueillies par des calculs sur l'ovalisation par rupture de parois des forages.

2.3.4 Comportement mécanique de la roche et du massif rocheux

Le comportement mécanique de la roche dans laquelle les matériaux radioactifs doivent être placés est un aspect fondamental de la performance du site. Il doit être connu en détail, parce qu'il influence de nombreux aspects de la performance du site de stockage et de l'évaluation de sûreté. Chronologiquement :

- Il aura d'abord une influence significative sur la constructibilité, et sur le coût de construction.
- Deuxièmement, il déterminera des exigences de soutènement et d'armatures.

¹⁰ Par exemple Sugihara et al., 1999, Chandler, 1999, Sato et al., 2000

¹¹ De Marsily et al., 2002

¹² Par exemple ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, Chapitre III, ANDRA Programme prévisionnel 1999, ANDRA Cahier des charges REP, ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000. Voir aussi CNE 2001, 2003, pp 27-28, 31, 34-35, 47

¹³ CNE, 2003, p. 26 ; Annexe A du chapitre 5, pp 47-48

- Troisièmement, il pourra influencer la réversibilité : les alvéoles de stockage et les galeries d'accès demeureront-elles suffisamment stables, sur une période suffisamment longue, pour permettre de retirer les matériaux radioactifs, si cela devait devenir souhaitable ou nécessaire ? Bien qu'en principe cela soit certainement possible, creuser à nouveau des alvéoles de stockage effondrées, sans aucun doute, compliquerait considérablement la reprise des déchets stockés, et la rendrait plus dangereuse.
- Quatrièmement, au fil des années, il influencera (i) le type de charge qui pourrait se développer sur les matériaux stockés et, (ii) le type de déformations que la roche pourrait subir, avec comme conséquence un impact éventuel sur l'écoulement de l'eau et des gaz.
- Cinquièmement, il déterminera l'ampleur et les caractéristiques de n'importe quelle zone perturbée par l'excavation, et par conséquent les scellements qui seront nécessaires.
- Finalement, il déterminera la charge et la déformation auxquels tous les remblayages et/ou scellements pourront être soumis.

La caractérisation du comportement mécanique de la roche hôte d'argilite est particulièrement importante parce que ces matériaux sont notoirement difficiles à caractériser.¹⁴ Typiquement, ces roches, et les massifs rocheux qui en sont constitués, sont nettement affectés, parfois très fortement, par des influences environnementales, par exemple par l'humidité et les changements de la teneur en humidité, ce qui renforce la difficulté à prédire leurs comportements, particulièrement à long terme. De plus, les effets chimiques et thermiques pourraient affecter encore plus le comportement mécanique des argilites. Par conséquent il est nécessaire de les inclure dans des études dont l'objectif est de prédire le comportement à long terme de ces matériaux

2.3.5 Constructibilité

Bien que la constructibilité puisse apparaître une nécessité évidente pour une installation souterraine, elle a, dans le contexte actuel, des implications à la fois plus larges et plus étroites que le simple sens littéral d'être constructible. Elle a des implications importantes tant sur le coût que sur la performance, cette dernière étant d'une importance cruciale pour une installation nucléaire. C'est vraisemblablement pour ces raisons que la constructibilité est l'un des critères recommandés par la règle française de sûreté pour l'implantation d'un site de stockage.¹⁵

¹⁴ Par exemple Lashkaripour, 2002

¹⁵ Par exemple Hoorelbeke et al., 2003, section 2

2.3.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage

C'est un fait bien établi qu'une construction faite sans précautions/négligée, notamment le creusement effectué avec des explosifs, peut avoir un effet très néfaste sur la roche avoisinante.¹⁶ En raison de l'impact important que ce genre de dommages pourrait avoir sur la performance du site de stockage (voir section 2.2.3 sur l'EDZ), il est souhaitable, sinon impératif, que tout dommage causé par l'excavation soit limité à un niveau acceptable dicté par les exigences du confinement des déchets nucléaires. De même, l'interaction soutènement/armature, notamment avec des roches plus tendres déterminera quel déplacement ou convergence sera autorisé. Un déplacement ou une convergence excessive sont susceptibles d'engendrer un plus grand volume poral dans la roche avoisinante. Pour cette raison l'enchaînement des étapes de la construction, la rigidité du soutènement/de l'armature, et le moment de son installation, peuvent être des variables importantes pour contrôler l'EDZ. Les travaux de construction devraient être planifiés, conçus, sous traités, mis en œuvre, et supervisés/surveillés en conséquence. L'ANDRA est très consciente de ces facteurs, et les a analysés à plusieurs reprises.¹⁷ Il est important de souligner que la majorité des dommages intervenant pendant la construction seront susceptibles d'être, au moins partiellement, permanents. Il est possible qu'un certain degré de cicatrisation, de scellement, de fermeture des volumes poraux, etc. puisse se produire, avant ou après la fermeture. Néanmoins, il sera, en toute probabilité difficile de démontrer de façon fiable ces avantages "curatifs", et par conséquent de s'appuyer sur eux pour les évaluations de performance. Il est par exemple tout à fait possible qu'intervienne une reconstruction d'un état de contraintes plus uniforme en raison d'une convergence sur une armature rigide. Mais il est loin d'être évident que cela puisse ramener la perméabilité à son état d'origine. Pour cela il faudrait que les surfaces des diaclases et des fractures se rejoignent parfaitement pour assurer l'étanchéité.

2.3.7 Scellement

Pour la plupart des sites de stockage le scellement final est considéré comme absolument nécessaire. L'Agence internationale de l'énergie atomique dans son *Draft Safety Requirements* (Version provisoire des exigences de sûreté),¹⁸ analyse la "Disposal facility closure" (la fermeture de l'installation de stockage) dans la spécification 19 :
« L'installation de stockage sera fermée de façon à assurer à long terme les fonctions de sûreté dont l'importance a été établie par le scénario de sûreté. Les programmes de fermeture [...], seront bien définis et faisables, pour que la fermeture puisse se faire sans risque à un moment approprié. Les fonctions de sûreté d'une installation de stockage, sur le long terme, dépendront d'un certain nombre d'activités, dont la qualité du remblayage et du scellement de l'installation de stockage. La nécessité de la fermeture doit être prise en compte dans la conception initiale de l'installation, et la planification de la fermeture et la conception des scellements doivent être actualisées au fur et à mesure de l'avancement

¹⁶ Par exemple Hoek et Brown, 1980, pp 367, 380

¹⁷ Par exemple ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 195

¹⁸ IAEA, 2003

des travaux de conception des ouvrages. Dans la mesure du possible, la faisabilité et l'efficacité de la mise en place de matériaux de remblayage et de scellement devraient être démontrées à l'avance. »

La majorité des programmes de stockage de déchets nucléaires dans le monde ont mené d'importantes études sur le scellement du site,¹⁹ et certains ont réalisé des essais in situ à grande échelle, notamment centrés sur les techniques de mise en place.²⁰ Ces dernières sont particulièrement importantes étant donné que la performance in situ d'un scellement en grandeur nature dépend étroitement de la procédure et de la qualité d'installation, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas dépendre uniquement des propriétés des matériaux. A moins qu'une installation satisfaisante puisse être assurée, les caractéristiques des matériaux, par elles-mêmes, ne pourraient être que d'une importance secondaire.

Tout indique que le scellement sera nécessaire pour le site de stockage de Bure. L'objectif principal du scellement est de réduire, à un niveau répondant aux exigences de la performance du confinement des déchets nucléaires, le risque d'ouverture de voies préférentielles à l'eau à travers le creusement des alvéoles et/ou des galeries d'accès. La Commission nationale d'Evaluation a souligné l'importance des études de scellement, étant donné le rôle critique du scellement à Bure, et notamment la nécessité d'essais souterrains in situ.²¹ Elle identifie le scellement comme un problème majeur.

2.3.8 Contrainte

L'état de contrainte dans la roche est important pour plusieurs raisons. L'importance relative de la contrainte vis-à-vis de la résistance détermine la stabilité des cavités. Le rapport contrainte/résistance influence la gravité des dommages dans la zone perturbée par l'excavation, et la profondeur à laquelle les perturbations se propagent. Le rapport entre l'ampleur des principales contraintes, en particulier entre la plus grande contrainte principale et la plus petite contrainte principale, affectera les concentrations de contrainte autour des cavités. Ce rapport pourrait être un élément à prendre en compte pour choisir la meilleure orientation et la forme des excavations. Un effet identique pourrait résulter des directions des principales contraintes.

C'est un fait bien établi que les mesures de contrainte sont difficiles²² dans des roches plus tendres, particulièrement dans les roches sensibles à l'humidité. Par conséquent il ne serait pas surprenant qu'une certaine incertitude subsiste sur l'état de contrainte à Bure, particulièrement dans le Callovo-Oxfordien.

Les résultats déjà obtenus sur le site, notamment les mesures directes sur l'ovalisation par rupture des parois des forages, sont particulièrement utiles et instructifs puisqu'ils fournissent une base physique directe pour faire des prédictions sur l'endommagement de

¹⁹ Par exemple Pusch, 2002

²⁰ Par exemple Pusch, 2001, chapitre 8

²¹ CNE, 2002, p. 39

²² Par exemple Martin et Lanyon, 2003

l'excavation, sans avoir recours à des analyses intermédiaires indirectes. Des analyses sont nécessaires pour transposer les ovalisations des forages aux dimensions des endommagements potentiels associés au creusement des puits et tout particulièrement des galeries. La nécessité de faire des analyses et des modélisations pour les galeries est d'autant plus importante que leur orientation est différente de celle des forages (verticaux), autant du point de vue du champ de contraintes que de la structure dominante des stratifications, dans ces formations sédimentaires.

2.3.9 Modélisation

La modélisation du comportement mécanique des roches encaissantes est un élément essentiel d'un programme de recherche pour l'étude du confinement à long terme des matériaux radioactifs dans un site de stockage en couche géologique profonde. Puisque, par définition, il n'est pas possible d'étudier physiquement le comportement à long terme du massif rocheux, toutes les prévisions de performance pour le long terme doivent se faire à partir de la modélisation, en grande partie numérique. Par conséquent la modélisation joue un rôle critique dans l'évaluation de la performance à long terme et de la sûreté d'un site de stockage.²³

Dans une certaine mesure, la qualité de la modélisation et de l'entrée des données peut être évaluée par une surveillance et des investigations in situ du comportement du massif rocheux, par exemple pendant et après la construction du laboratoire souterrain. Des comparaisons entre les prédictions des modèles et les mesures sur le terrain seront des plus utiles pour évaluer la pertinence des efforts des prédictions des modèles réalisés à ce jour.

2.3.10 Instabilités structurales majeures résultant des effets du site de stockage

Il n'est pas clair que les instabilités principales le long des structures géologiques principales (c'est-à-dire des failles), induites par des effets du site de stockage, doivent être discutées dans ce chapitre sur la mécanique des roches. Elles sont mentionnées ici, d'une part parce que Fairhurst les inclut dans son importante publication de synthèse sur les "*Rock Mechanics and Nuclear Waste Repositories*",²⁴ et d'autre part pour souligner que ces questions doivent être traitées quelque part.

2.4. Éléments de la recherche poursuivie par l'ANDRA

²³ Par exemple CNE «réversibilité», 1998, résumé, D

²⁴ Fairhurst, 1999

2.4.1 Recherche en cours

2.4.1.1 Réversibilité

Il est clair que l'ANDRA a porté une attention considérable à la question de la réversibilité. Le sujet est par exemple fréquemment mentionné dans le Dossier 2001 Argile.²⁵ La section II.8 présente une stratégie exhaustive pour assurer la réversibilité des diverses classes de déchets, en fonction de la phase de fonctionnement à laquelle la décision de reprendre les colis pourrait être prise. Cette section ne fait pas apparaître clairement si l'ANDRA s'est engagée à accompagner ce résumé détaillé des stratégies de reprise de colis par des études d'ingénierie détaillées démontrant ce qu'il faudra effectivement faire pour effectuer cette reprise.

Le Dossier 2001 Argile contient un bref inventaire du type d'instrumentation capable de surveiller la stabilité des alvéoles.²⁶ Par contre, il n'est pas précisé si la faisabilité, la praticabilité, et la durée de l'utilisation de cette instrumentation dans l'environnement d'un site de stockage de déchets nucléaires seront évalués. Il n'y a aucune indication qui permettrait de savoir si de futures études et de quels types sont envisagées (par exemple dans le laboratoire souterrain ?). Sur ce sujet l'ANDRA pourrait considérablement bénéficier du retour d'expérience acquis dans d'autres programmes,²⁷ en tenant compte évidemment du fait que les changements en fonction du temps (par exemple soutènement charge/déformation, convergence) sont susceptibles d'être très différents dans l'argilite par rapport à ceux dans le granit. Par conséquent des ajustements technologiques peuvent être nécessaires.

2.4.1.2 Stabilité à long terme de l'excavation

Il n'apparaît pas clairement que l'ANDRA traite spécifiquement et explicitement de cette question, bien que beaucoup d'études, en cours et prévues, fourniront des informations sur cette question. L'ANDRA a développé des modèles constitutifs pour décrire le comportement à long terme des échantillons de roche. Néanmoins ceux-ci ne traitent que d'un seul aspect de la stabilité de l'excavation sur le long terme. Une analyse complète de ce sujet doit également prendre en compte le comportement à long terme (c'est-à-dire la durabilité) de tout le système de soutènement et/ou de l'armature. Elle doit aussi considérer le comportement de la détérioration éventuelle du massif rocheux qui ne pourrait pas être pris en compte dans les modèles continus développés à partir des expériences de laboratoire, notamment ceux qui portent sur la déshydratation et/ou plus généralement des changements d'humidité. Finalement, de manière générale, les effets thermiques, chimiques, hydrologiques et même biologiques devraient être également étudiés

²⁵ Par exemple ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, section II.8

²⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 182

²⁷ Par exemple Kalbantner et Sjöblom, 2002

2.4.1.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)

L'ANDRA a développé un programme détaillé pour étudier la zone perturbée par l'excavation. De plus, elle a participé à d'autres programmes qui étudient cette question, et ceci depuis un certain temps.²⁸

Étant données les ovalisations observées dans les forages sur ou près du site de Bure²⁹ il se pourrait très bien qu'une importante zone perturbée se développe autour des cavités, en particulier dans les puits d'accès, les galeries d'accès, et les alvéoles de stockage. Par conséquent une recherche in situ détaillée et robuste est entièrement justifiée. Des observations in situ seront essentielles.

L'ANDRA a développé un programme de surveillance de la réponse de la roche au fonçage des puits. Ce travail est vraisemblablement en cours d'avancement.³⁰

Une étude a été menée sur les mécanismes géochimiques de scellement potentiels dans la zone perturbée.³¹ Certains résultats sont suffisamment encourageants pour justifier des recherches supplémentaires, ainsi que le recommande cette étude.

L'ANDRA (2001)³² donne des dimensions assez précises pour différents types de perturbations autour des alvéoles. Elles se fondent vraisemblablement sur des analyses (qui ne sont pas citées), et semblent indiquer que beaucoup de travaux de modélisation ont été déjà achevés sur ce sujet.

L'ANDRA présente un excellent programme d'étude pour continuer la caractérisation de la zone endommagée et,³³ ce qui est peut-être encore plus important, des mesures à prendre pour limiter, ou même annuler, tout dommage aux endroits où des scellements permanents doivent être installés. Il est particulièrement encourageant de noter que l'ANDRA constate que la construction d'une zone d'ancrage pour un scellement, dont l'objet est d'interrompre efficacement tout écoulement le long de la zone perturbée ou endommagée, présente des difficultés non négligeables, et que cette question mérite donc beaucoup d'attention. Il n'est cependant pas évident que ces facteurs aient été pris en compte, et dans quelle mesure, pour la construction en cours (le fonçage des puits en cours et, bientôt, le creusement en profondeur de la niche et des galeries).

2.4.1.4 Comportement mécanique de la roche

²⁸ Par exemple Alheid et al., 1999 ; ANDRA Programme prévisionnel 1999; GdR FORPRO, 2002

²⁹ ANDRA Ovalisation 1997; voir aussi Heitz et al., 1999

³⁰ ANDRA Cahier des charges REP, 2001

³¹ Homand et Chatelineau, sans date, référencé dans ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.5.5

³² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 146

³³ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

L'ANDRA a mis en place un important programme d'étude sur le comportement mécanique de l'argilite du Callovo-Oxfordien. Elle a accompli toute une série d'études de caractérisation en laboratoire très impressionnantes.³⁴ L'ANDRA a sans aucun doute mené un programme remarquablement sophistiqué d'essais géomécaniques en laboratoire sur le comportement complexe des composants de l'argilite. Néanmoins il semble qu'il n'existe pas d'études semblables ou parallèles sur la caractérisation géomécanique des discontinuités dans l'argilite, notamment des plans de stratification et des diaclases. A ce sujet il faut insister tout particulièrement sur l'influence potentielle que pourraient avoir les stratifications sur le comportement mécanique anisotrope du massif rocheux. Il est important de savoir si cette question a fait l'objet de recherche et si des dispositions sont prises pour l'étudier. On s'attend généralement à un comportement mécanique anisotrope avec ce type de massifs sédimentaires. Il faudra donc présenter des éléments convaincants pour affirmer avec confiance qu'une modélisation isotrope est suffisante dans le cas de Bure.

L'obligation faite par la Règle fondamentale de sûreté d'étudier l'hétérogénéité géotechnique et la variabilité spatiale dans la couche hôte a été abordée dès le début par l'ANDRA dans un rapport de 1996.³⁵ Ce rapport fait également mention de la constructibilité, mais uniquement dans le contexte d'une affirmation plutôt générale et non étayée. L'ANDRA fournit des éléments plus complets et plus détaillés sur le travail de variabilité spatiale.³⁶

La variabilité spatiale des propriétés géomécaniques a été étudiée à partir d'un grand nombre de mesures des vitesses sismiques, des essais de compression (uniaxiale et triaxiale), et des modules de déformation.³⁷ Les résultats ont permis l'identification de différentes zones, au moins dans la direction verticale, pour le comportement géomécanique. Des corrélations avec la minéralogie/pétrologie permettront vraisemblablement de faire des extrapolations fondées sur la caractérisation géologique, et permettront de traiter, au moins indirectement, la question de la continuité et de la variabilité latérales. Ces essais ont également comporté une recherche sur l'anisotropie de la roche.

Bien que les publications de l'ANDRA font de temps à autre mention de la nécessité et de la difficulté d'extrapoler le comportement mécanique de la roche de l'échelle du laboratoire au comportement en vraie grandeur,³⁸ il n'est pas encore précisé jusqu'où cet effort d'extrapolation a été poursuivi. Ce problème a été identifié par la Commission nationale d'évaluation,³⁹ spécifiquement dans le contexte de la transposition des résultats du Mont Terri à Bure.

³⁴ Par exemple Hoteit et al.,1998, Nguyen Minh et al.,1999, Gasc-Barbier et al.,1999, ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, section IV.3.1.2 ; ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.1, mais plus particulièrement, Wright et al.,2000, Valès et al.,2002, Zhang et Rothfuchs plus détaillés, 2002, Gratier et al.,2002, Bemer et al.,2002, Malinsky et al.,2002

³⁵ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, section 1.3.5 et p. 45

³⁶ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, chapitre IV

³⁷ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, chapitre IV

³⁸ Par exemple ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001

³⁹ CNE, 2003, p. 33

Des essais ont été réalisés sur l'effet des températures élevées sur la résistance et la rigidité des argilites du Callovo-Oxfordien.⁴⁰ Ces résultats prouvent que cet argilite pourrait connaître un affaiblissement significatif une fois exposé à des températures situées entre 80 et 100 °C. Il est donc extrêmement important que des données de performance plus robustes soient obtenues là où pourraient intervenir de telles températures.

2.4.1.5 Constructibilité

L'ANDRA⁴¹ a déclaré très tôt que la constructibilité ne devrait pas être un problème important et que la construction (au moins du laboratoire souterrain) devrait être faisable sans aucune difficulté particulière. Cette affirmation a été reprise,⁴² une fois encore avec peu de justifications ou d'éléments pour l'étayer et, ce qui est plus grave, sans référence(s) à des études plus détaillées qui pourraient la rendre plus crédible. Néanmoins, il a aussi été admis⁴³ qu'une caractérisation mécanique de la roche plus avancée était nécessaire pour la conception du site de stockage. ANDRA⁴⁴ contient une analyse importante des méthodes de construction et d'une éventuelle coordination construction/exploitation (mise en place de déchets).

2.4.1.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage

L'ANDRA reconnaît que les effets de la construction peuvent avoir une influence sur la performance du site de stockage. Elle a mis en place un programme pour observer, tout particulièrement, la perturbation le long des puits en cours de fonçage.

2.4.1.7 Le scellement

L'ANDRA a reconnu depuis longtemps la nécessité de prendre en compte, dans ses recherches, les normes de scellement.⁴⁵ L'impact de la zone perturbée sur des exigences de scellement a en particulier été mentionné à plusieurs reprises. L'ANDRA coopère avec Mont Terri sur des expériences de scellement

Un vaste programme d'essais sur les matériaux de scellement semble se poursuivre.⁴⁶ La Commission nationale d'évaluation a soulevé un certain nombre de problèmes scientifiques qui doivent être résolus pour accorder une confiance totale à la performance

⁴⁰ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.8.2.2

⁴¹ ANDRA Résultats, 1996, p. 39

⁴² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

⁴³ ANDRA Résultats, 1996, pp. 45-46

⁴⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, II.7

⁴⁵ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, p. 46

⁴⁶ CNE, 2002, pp. 47-49

des matériaux de scellement, notamment la durabilité de ces matériaux dans le milieu spécifique au sein duquel ils devront agir et rester fonctionnels pendant une très longue période de temps. Néanmoins, il n'est pas évident que la technologie de mise en place de scellement soit une question résolue, ou tout du moins, comme la discussion semble l'indiquer, dénuée de difficulté. La qualité et l'importance du travail de soutènement sera, dans le cas de Bure un critère important pour l'installation d'un scellement. Cette question est cruciale puisqu'il est très probable que le soutènement subira des contraintes, celles-ci pouvant être sévères.

L'ANDRA a mené des expériences en laboratoire sur la caractérisation des matériaux de remblayage.⁴⁷

2.4.1.8 Les mesures de contrainte

L'ANDRA a fait des efforts louables pour mesurer l'état de contrainte du site de Bure, et notamment de l'argilite du Callovo-Oxfordien.⁴⁸ Puisque les résultats sont basés sur un ensemble de méthodes bien établies (fracturation hydraulique, ovalisations,⁴⁹ réseaux de contraintes régionaux), il est raisonnable de penser que l'état de contrainte est plutôt bien connu. Clairement, il serait souhaitable de confirmer ces mesures par des mesures supplémentaires in situ quand la galerie d'accès sera disponible. Néanmoins, les résultats sont suffisamment cohérents pour indiquer que l'état de contraintes dans le Callovo-Oxfordien semble plus ou moins favorable, tout du moins du point de vue d'une construction souterraine/des ouvrages souterrains, avec un champ de contrainte quelque peu anisotrope. Comme le confirment les ovalisations des forages, on peut s'attendre à un endommagement significatif autour des excavations à moins que cet endommagement puisse être restreint par des renforcements forts, rigides, et installés très rapidement.⁵⁰

2.4.1.9 La modélisation

L'ANDRA poursuit depuis un certain temps un effort impressionnant de modélisation géomécanique, notamment de modélisation mécanique et hydromécanique.⁵¹ La modélisation «*en continu*» du comportement géomécanique de l'argilite effectuée par l'ANDRA reflète sans aucun doute l'état de l'art dans ce domaine. Par contre il n'est pas évident que l'effort de modélisation ait suffisamment porté sur l'impact potentiel des discontinuités, en particulier des plans de stratification et des diaclases, sur le comportement du massif rocheux.

⁴⁷ Par exemple Fleureau et al.,2002

⁴⁸ Par exemple ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.7, Wileveau, 2004

⁴⁹ Par exemple Heitz et al.,1999

⁵⁰ ANDRA ovalisatoins 1997.

⁵¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, Chapitre III, ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001, chapitres 2 et 3, mais particulièrement annexe 1, Vaunat et al.,2002, Hoxha et al.,2002, Miura et al.,2002, Conil-Aublivé et al.,2002, Kolmayer et al.,2002, Cosenza et al.,2002

2.4.2 Travaux envisagés

De nombreux documents décrivent les programmes de recherches extensifs et exhaustifs que l'ANDRA propose de faire.⁵² L'ANDRA a sans aucun doute développé des programmes de recherches approfondis sur la mécanique des roches qui fourniraient une grande partie des informations requises pour une évaluation de sûreté, s'ils pouvaient être mis en application dans les délais impartis. Les questions qui demandent plus d'attention sont abordées dans la section 2.6, qui traite des imperfections de recherches, et la section 2.10, qui traite des recommandations.

2.4.2.1 La réversibilité

Bien que les futurs efforts de recherche géomécanique se rapportant directement à la réversibilité ne soient pas clairement définis, il apparaît que des travaux supplémentaires approfondis sont envisagés pour fournir à la fois des informations et des indications supplémentaires pour les études sur la réversibilité. Ces études portent principalement sur la surveillance in situ des excavations et les investigations prévues sur la mécanique des roches. Le programme d'instrumentation du soutènement prévu est particulièrement important de ce point de vue.

2.4.2.2 La stabilité à long terme de l'excavation

Il n'est pas précisé clairement si l'ANDRA dispose d'un programme pour traiter cette question, mais la plupart des données rassemblées sur des sujets s'y rapportant (notamment des études de modélisation de comportement de la roche et des études correspondantes sur l'EDZ et la réversibilité) s'intéressent directement à la question de la stabilité à long terme de l'excavation. Il est clair que depuis un certain temps l'ANDRA a poursuivi un programme sophistiqué d'essais en laboratoire sur le comportement mécanique de la roche hôte en fonction du temps.⁵³

2.4.2.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)

L'ANDRA a mis en place un important programme de caractérisation de l'EDZ.⁵⁴ Elle a même mis en place un programme d'étude sur la faisabilité d'atténuer l'impact négatif de toute zone perturbée.⁵⁵ De plus, plusieurs études connexes fourniront des informations supplémentaires au sujet de l'EDZ.⁵⁶ L'ANDRA a activement participé à des études sur la zone perturbée à Mont Terri. Nous sommes de l'avis que tous ces programmes et études poursuivies par l'ANDRA indiquent que celle-ci est très consciente de l'importance de

⁵² Par exemple ANDRA, 2002-2005

⁵³ Par exemple ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.5

⁵⁴ ANDRA Cahier des charges REP, 2001, ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001, GdR FORPRO, 2002

⁵⁵ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

⁵⁶ Par exemple ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000

l'EDZ comme voie de passage pour l'eau qui pourrait constituer un court-circuit dans la formation hôte.

2.4.2.4 Comportement mécanique de la roche

L'ANDRA a depuis longtemps reconnu la nécessité de vérifier in situ le comportement mécanique de la roche,⁵⁷ parce que de telles données seront essentielles pour la conception des ouvrages du site de stockage ainsi que pour des évaluations de sûreté (confinement). Il s'avère que la majeure partie de la caractérisation mécanique de l'argilite in situ sera accomplie par des essais au dilatomètre.⁵⁸ Dans ces brèves mentions des essais, la façon de transposer ces résultats aux propriétés sous différents cheminements de contrainte n'est pas mentionnée. L'ANDRA indique à plusieurs reprises que les divers programmes d'essai en laboratoire se poursuivent.⁵⁹ De plus, il est prévu de multiples exercices de caractérisation tels que la surveillance par extensiomètres. La façon dont l'information obtenue de ces diverses sources sera intégrée demande à être clarifiée.

2.4.2.5 Constructibilité

L'ANDRA a projeté depuis longtemps d'employer des essais in situ dans le laboratoire souterrain à l'appui des études de constructibilité.⁶⁰ La construction même du laboratoire sera une étape majeure dans la démonstration de la constructibilité

2.4.2.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage

Au minimum, les effets de la construction sur la performance du site de stockage seront intégrés implicitement dans les études approfondies qui sont prévues sur l'EDZ.⁶¹ Bien que des remarques soient faites à de nombreuses reprises dans les documents de l'ANDRA identifiant l'impact éventuel des effets de construction sur la performance du site de stockage, il n'apparaît pas clairement dans quelle mesure ces effets ont été pris en compte ou sont étudiés. A ce sujet, la perturbation qu'engendrera l'EDZ quand les soutènements et/ou les armatures seront enlevés pour pouvoir installer les scellements est une question de grande importance. Les expériences du passé sur le retrait des supports ne sont pas encourageantes.⁶²

⁵⁷ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, p. 46, ANDRA Programme prévisionnel 1999

⁵⁸ Par exemple ANDRA Programme prévisionnel 1999, section 2.3.1, ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000, sections 4.3, 4.4

⁵⁹ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001

⁶⁰ ANDRA Résultats, 1996, p. 45

⁶¹ GdR FORPRO, 2002

⁶² e.g. Dereeper and Volckaert, 2002

2.4.2.7 Le scellement

L'ANDRA dispose d'un programme suivi d'étude des matériaux de scellement.⁶³ Elle prévoit une simulation d'essai de scellement pour démontrer la faisabilité de la prévention des écoulements à travers ou le long de l'EDZ. Dans la section 2.6 : *les insuffisances de la recherche*, de sérieuses réserves sont émises sur cet essai. ANDRA⁶⁴ décrit un programme important de recherche sur la faisabilité de ramener une zone perturbée quelconque à un état similaire à celui de la roche non perturbée, et de réduire ainsi la possibilité qu'une zone endommagée entourant les excavations devienne une voie de passage préférentielle pour la migration des radionucléides. Le document de programmation, reconnaît clairement et explicitement que la restauration autour des cavités soulèvera des difficultés majeures.

2.4.2.8 Mesures de contrainte

L'ANDRA a déjà accompli une campagne détaillée de mesures de contrainte. Elle décrit les mesures de contrainte supplémentaires prévues, leur nombre, leur emplacement, leur type, etc.⁶⁵ Au minimum de nouveaux calculs de contrainte découleront de la modélisation approfondie prévue pour étayer l'analyse des mesures in situ (par exemple convergence, EDZ). Il est très probable que la plupart des incertitudes sur l'état des contraintes du site seront résolues très tôt par l'investigation in situ en profondeur et que les incertitudes restantes sont suffisamment réduites pour ne pas avoir une influence déterminante sur une quelconque conclusion portant sur l'acceptabilité du site.

2.4.2.9 Modélisation

Il est clair qu'une modélisation supplémentaire considérable est prévue, notamment pour étayer les mesures sur le terrain (par exemple convergence, caractérisation de l'EDZ), même si une modélisation importante a déjà été réalisée. Pratiquement tous les programmes géomécaniques in situ évoquent d'importantes modélisations supplémentaires.⁶⁶

2.5. Relation(s) entre les éléments de recherches (2.4) et les questions techniques (2.3)

⁶³ CNE, 2002, pp 48-9, 51

⁶⁴ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

⁶⁵ ANDRA Programme prévisionnel 1999

⁶⁶ Par exemple ANDRA Cahier des charges REP, 2001, chapitre 3, ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, chapitre 3, ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001, chapitres 2 et 3, ANDRA Cahier des charges KEY, 2002, section 3.3

Les paragraphes des sections précédentes (2.3), les questions techniques et (2.4), les éléments de recherches ont les mêmes sous-titres, et apparaissent dans le même ordre, pour faciliter la lecture. Il y a cependant des recouvrements entre la plupart de ces paragraphes, voire la totalité. Par exemple, les essais en laboratoire introduisent la modélisation qui, à son tour, introduit la caractérisation de l'EDZ. Les observations sur le terrain et la surveillance de l'EDZ fournissent les informations nécessaires pour la modélisation en permettant, par exemple, une calibration sur le terrain des paramètres du modèle, et peuvent fournir de nouvelles données pour poursuivre les essais en laboratoire destinés à affiner des comportements, des modèles ou des paramètres.

2.6 Évaluation de la recherche : exhaustivité et pertinence

De façon générale les programmes de recherche de la mécanique des roches du site de Bure comportent beaucoup d'éléments qui sont excellents, et devraient fournir les informations nécessaires pour évaluer la faisabilité d'un site de stockage. Par contre, l'intégration de tous ces éléments dans le cadre d'une évaluation de la performance du site de stockage est absente. Il n'apparaît pas clairement comment et pourquoi certaines investigations de la mécanique des roches se rapportent aux exigences du confinement des déchets nucléaires et comment elles seront utilisées pour l'évaluation de la performance. Naturellement, le problème réside dans les délais impartis. Il est difficile d'imaginer comment une recherche, même partielle, pourrait être menée à bien d'ici fin 2005.

Une des réserves que nous émettons sur le programme de recherche porte sur les questions de l'hétérogénéité et de la variabilité spatiale qui ne semblent pas être suffisamment étudiées. La poursuite des caractérisations géologiques et géophysiques apportera vraisemblablement les justifications nécessaires, mais on ne sait pas très bien si des observations directes et suffisantes sont envisagées (c'est-à-dire distinctes des observations indirectes, comme par exemple des corrélations avec la minéralogie, la pétrographie, la densité, la vitesse sismique) pour la variabilité des propriétés et des caractéristiques de la mécanique des roches. Une question similaire se pose pour le champ de contrainte et pour les mesures de contrainte.

2.7 Les insuffisances de la recherche

Le problème majeur de la recherche en cours et de la recherche envisagée réside dans le fait que seuls des essais in situ des plus élémentaires pourront être menés dans les délais impartis. Ceci pose bien sûr un problème de crédibilité. La question de la date butoir n'est pas nouvelle.⁶⁷ On peut même se demander si le calendrier de départ développé pour ce programme aurait pu être respecté. Les retards dans la construction d'ouvrages souterrains ne sont certainement pas rares et ne peuvent être considérés comme totalement imprévisibles. La Commission, sur ce point et d'autres, a proposé des

⁶⁷ Par exemple CNE, 2001, p. 11

approches visant à minimiser l'impact négatif sur l'analyse de sûreté qui résultera vraisemblablement des retards par rapport à l'échéance de 2006. Toute approche visant à mettre en place des mesures correctives serait souhaitable, bien que cela soit difficile si près des échéances.

Une des faiblesses majeures du programme de recherche géomécanique se trouve dans l'absence apparente d'un plan d'ensemble qui établit un lien entre la nécessité d'informations géomécaniques et la performance du site de stockage. De ce fait, on ne sait pas bien quel type de données sont nécessaires pour effectuer des évaluations de sûreté du site de stockage et si toutes les données qui seront nécessaires seront obtenues.

L'essai simulé proposé pour le scellement d'une saignée dans le laboratoire souterrain pourrait être de valeur et d'utilité marginales, et devrait être reconsidéré. L'essai proposé sera effectué dans un endroit où, par définition, le développement de l'EDZ n'aura progressé que sur une courte période de temps, peut-être de quelques mois seulement. On peut s'interroger sur la représentativité de ce type de test pour le scellement de l'EDZ quand celle-ci se sera développée sur beaucoup d'années, plus probablement des décennies. L'interaction entre un vérin plat et la roche hôte sera très probablement différente de celle entre l'argile gonflante et la roche hôte, certainement pour les interactions prenant place au point de contact entre les deux types de "scellements".

Tout d'abord, le scellement de l'EDZ est-il vraiment la priorité absolue (vu les contraintes de temps) pour ce programme très limité de caractérisation du site ? On peut certainement avancer l'argument qu'il vaudrait mieux, en premier lieu, développer in situ une connaissance plus réaliste de l'EDZ, de ses propriétés, de ses caractéristiques, etc. avant même de concevoir un système de scellement.

Deuxièmement, l'essai de scellement proposé semble extrêmement artificiel. (Je dois ajouter que ces critiques sont basées sur des descriptions extrêmement brèves et superficielles de l'essai, et que je n'ai pas eu l'opportunité de consulter d'analyse expliquant ou justifiant ce test.) L'essai sera réalisé très vite après l'excavation, c'est-à-dire bien avant qu'une importante détérioration puisse se manifester (en supposant qu'une détérioration se produira).

Troisièmement, il est difficile de concevoir comment et pourquoi l'augmentation de la composante de la contrainte parallèle aux parois de la galerie réduira la perméabilité dans cette direction. Bien qu'il soit généralement admis qu'un essai de saignée puisse réduire la perméabilité parallèlement à la saignée, cet effet reste très localisé. La perméabilité, qui pourrait augmenter parallèlement à l'excavation à sceller, pourrait s'avérer au moins aussi importante. Il serait souhaitable de faire une analyse approfondie des conséquences de cette méthode de scellement.

Quatrièmement, il est difficile de concevoir comment un vérin plat peut simuler un scellement de bentonite sinon dans ses aspects les plus rudimentaires. Il semble évident que même les interactions physiques/mécaniques entre un vérin plat et un anneau de bentonite seront entièrement différentes, ainsi que, en toute probabilité, l'interface

hydraulique entre le scellement et la roche hôte. Nous constatons que certaines de ces remarques ou critiques ne sont pas nouvelles – certaines sont faites par la Commission nationale d'évaluation,⁶⁸ elles sont donc faites ici pour renforcer explicitement les réserves et les préoccupations relatives à cet essai. D'un autre côté, une connaissance approfondie du même essai au Mont Terri serait d'une valeur incalculable. Il devrait en effet fournir des informations conceptuelles de base sur la méthode d'essai, et permettre une évaluation méticuleuse de son "succès", particulièrement du réalisme avec lequel l'essai simule une vraie conception et/ou un essai de scellement.

Il s'avère qu'aucun essai de durabilité par immersion, ou de tout autre essai similaire visant à déterminer les impacts mécaniques des changements de la teneur en humidité n'a été fait sur le Callovo-Oxfordien. Ceci est plutôt surprenant, puisque ce test est très utilisé, notamment pour les schistes,⁶⁹ et puisque les résultats peuvent se montrer très utiles pour identifier des problèmes de stabilité susceptibles de se manifester lors des excavations souterraines dans des formations de roche schisteuses. Bien que ce test puisse certainement être considéré comme plutôt rudimentaire, comparé à certains tests sophistiqués et ultramodernes déjà effectués en laboratoire par l'ANDRA, il peut être fait pour un coût modeste et rapidement. Par conséquent il peut s'avérer un outil efficace pour étudier, entre autres, les conséquences de la détérioration potentielle de l'argilite sur la variabilité spatiale et l'hétérogénéité. Celles-ci pourraient avoir des effets sur la stabilité des excavations, la détérioration, l'agrandissement de la zone endommagée, les travaux de soutènement/armature et, dans le cas extrême, sur la réversibilité. Les essais de durabilité sont normalisés par l'ASTM (American Society for Testing and Materials)⁷⁰ et font l'objet d'une procédure d'essai suggérée par l'ISRM (International Society for Rock Mechanics).⁷¹ Naturellement, il est souhaitable de procéder à des essais, simples de préférence, pour pouvoir en faire un nombre important en vue de déterminer les effets de l'assèchement, ou plus généralement les changements dans la teneur en humidité sur le comportement mécanique de argilites. (Bien que ce chapitre porte sur l'impact du comportement mécanique des argilites, il est évident que, par implication, il pourrait y avoir un impact sur les aspects de la performance hydrogéologique, notamment dans l'EDZ.)

L'ANDRA a admis à plusieurs reprises⁷² que l'ancrage des scellements pourrait demander le retrait du soutènement/armature, ainsi qu'un creusement supplémentaire. L'ANDRA admet aussi que ces activités doivent être accomplies sans réactiver la zone endommagée, et, surtout, sans causer de propagation plus profonde de l'endommagement et/ou de la perturbation. Bien qu'il y ait du mérite à reconnaître ce problème, il est difficile de savoir si un effort a été consacré à déterminer si ce travail doit être accompli, et comment. La question est d'autant plus pertinente qu'au moment où l'opération devra être réalisée, le soutènement/l'armature seront en place depuis de nombreuses années,

⁶⁸ CNE, 2003, p. 48

⁶⁹ Par exemple Goodman, 1989, pp 37-39 ;Hoek et Brown, 1980, pp 52, 54

⁷⁰ ASTM, 2000

⁷¹ Brown, 1981

⁷² Par exemple ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 196

probablement des décennies, et seront soumis à de lourdes charges, d'importantes contraintes, et probablement d'importantes déformations.

Il s'avère que très peu, ou même aucune attention explicite n'a été prêtée aux zones de subsidences et de discontinuités dans le massif rocheux, par exemple les plans de stratification et les diaclases. Ni les essais en laboratoire, ni la modélisation, ni les investigations prévues sur le terrain sur la mécanique des roches ne semblent porter directement sur les questions liées à l'influence que les discontinuités pourraient avoir sur divers aspects de la performance du site de stockage, la stabilité de l'excavation, l'EDZ, les déformations à long terme, la réversibilité, le scellement, le remblayage, la mise en place des colis, et les travaux nécessaires de soutènement/armature. Les discontinuités peuvent éventuellement avoir un effet néfaste sur beaucoup d'aspects géomécaniques de la performance du site de stockage⁷³ et, par conséquent, semblent mériter bien plus d'attention que celle qui leur est consacrée dans le programme de l'ANDRA.

Il y a peu ou pas d'indication permettant de savoir si la question de la variation des propriétés de la roche en fonction de la taille ou de l'échelle a reçu beaucoup d'attention. Il est bien connu que la transposition du laboratoire au comportement sur le terrain est presque toujours nécessaire⁷⁴ et que cet ajustement est souvent difficile. Il est prévu qu'un grand nombre de ces informations d'échelle soient recueillies lors des investigations in situ prévues, et qu'elles fassent partie des calculs de vérification et de la modélisation du comportement structural en vraie grandeur qui sera observé et surveillé. Néanmoins, une reconnaissance plus explicite de la nécessité d'étudier cette question confirmerait que son importance est reconnue, et qu'elle sera prise en compte

Les effets chimiques sur le comportement du massif rocheux méritent certainement plus d'attention que celle qu'ils ont reçue jusqu'à maintenant. Cela s'applique notamment aux roches argileuses dans lesquelles les modifications des taux d'humidité pourraient provoquer des changements importants dans les propriétés mécaniques. Ces changements seront certainement produits, en grande partie par la chimie des eaux souterraines et peut-être par les changements de températures qui se produiront simultanément.

2.8 Avancement des travaux et calendrier prévu

D'excellentes études de laboratoire et de modélisation ont été achevées, sont en cours, et méritent qu'on encourage leur poursuite. D'importants travaux sur le terrain (par exemple la diagraphie des puits) sont en cours. Cependant, ce travail ne peut que partiellement se substituer à des études in situ en grandeur nature. La contrainte du calendrier sera clairement la raison principale qui limitera l'état d'avancement de l'étude d'ici la fin de 2005. Dans ce contexte, il est intéressant de noter qu'en 1999 déjà la Commission nationale d'évaluation a exprimé son inquiétude vis-à-vis de ce calendrier très tendu.⁷⁵

⁷³ Par exemple Hakami et Olofsson, 2002

⁷⁴ Par exemple Lecampion et al., 2002

⁷⁵ CNE, 1999, p. 7

2.9. Comparaison avec d'autres programmes

Bien qu'il soit plus limité dans son objet que certains autres importants programmes de recherches sur le stockage souterrain des déchets nucléaires, le programme géomécanique de l'ANDRA traite de la plupart des importantes questions géomécaniques qui nécessitent une solution. La différence la plus sérieuse réside dans le temps excessivement court alloué à l'ANDRA pour mener des expérimentations in situ. Les autres programmes ont accès à des laboratoires souterrains depuis de longues années, et par conséquent ont pu effectuer des essais in situ sur une période prolongée. D'un autre côté l'ANDRA peut tirer parti de l'expérience acquise sur d'autres sites, ce qu'elle a déjà fait très efficacement. En particulier vu le temps très court qui lui reste jusqu'à la fin 2005, date à laquelle elle doit achever ses investigations, il est normal et souhaitable qu'elle maintienne des contacts étroits avec les autres programmes, afin de tirer avantage des résultats positifs obtenus, et d'éviter de répéter certaines erreurs. Il est évident qu'une coopération avec des organismes qui étudient des formations hôtes suffisamment proches de celle du site de Bure est très précieuse pour utiliser directement les résultats obtenus pour l'évaluation de sûreté.

Le programme suédois est probablement exemplaire en termes d'ampleur et d'approfondissement de la recherche, en termes de transparence, et en termes de la facilité d'accès à une documentation importante et détaillée.⁷⁶

2.10 Conclusions

L'ANDRA a élaboré un excellent programme de recherche géomécanique. D'excellentes études individuelles de laboratoire, de terrain, et de modélisation ont été menées à bien, et/ou sont prévues. Cependant, il est difficile d'imaginer comment un programme complet d'étude sur le terrain pourrait être accompli d'ici la fin 2005. L'absence d'intégration globale des diverses études sur la mécanique des roches dans l'évaluation de la performance du site pèse d'un poids encore plus important. Ceci est impératif pour permettre de conclure si le nombre d'essais prévus est suffisant pour apporter le degré de confiance nécessaire à une quelconque conclusion sur l'acceptabilité du site.

Pour ce qui concerne l'échéance exigée par la loi, elle ne pourra pas raisonnablement être satisfaite puisqu'un programme raisonnablement approfondi d'études in situ demanderait au minimum plusieurs années, probablement de l'ordre d'au moins cinq à dix ans. Il est difficile de concevoir comment obtenir autrement une compréhension suffisamment complète du comportement de la masse rocheuse à grande d'échelle, y compris de la compréhension essentielle du couplage des effets mécaniques, thermiques, hydrologiques, géochimiques et biologiques. Etant donné la variabilité et l'hétérogénéité intrinsèques de presque tous les massifs rocheux, et certainement de ceux qui sont

⁷⁶ Par exemple Milnes, 2002, SKB, 2001, 2002, 2003

stratifiés, les expérimentations doivent être conduites sur une échelle spatiale qui permet aux essais de rendre compte d'un volume raisonnablement représentatif de la masse rocheuse. Etant donné que le comportement de la roche varie avec le temps, l'essai doit être réalisé sur une période suffisamment longue pour confirmer qu'il est bien pris en compte dans les résultats d'un tel essai. Cela est d'autant plus vrai qu'il sera même alors nécessaire d'extrapoler ces résultats à des durées dépassant de loin celles pour lesquelles ces mesures peuvent être faites.

Etant donné l'impact du scellement et de l'EDZ sur la performance du site de stockage, dont l'ANDRA a conscience et reconnaît l'importance, une expérimentation réaliste sur ces aspects, dans l'horizon du site de stockage, serait presque impérative pour établir un climat de confiance. L'alternative proposée, un essai très artificiel de scellement, dans une EDZ qui ne s'est développée que sur une période très courte (certainement par rapport à la durée des exigences de performance, mais même par rapport à la durée opérationnelle de l'installation, c'est-à-dire par rapport au temps qu'il faudra pour que l'EDZ se développe, avant l'installation du scellement) n'est ni convaincante, ni satisfaisante. Il est très important que tous les efforts possibles soient faits pour développer une connaissance complète de l'EDZ, de son comportement et de ses caractéristiques, notamment de son évolution dans le temps.

La façon dont les investigations géomécaniques contribuent aux évaluations de performance du site et dont elles sont reliées aux exigences du confinement des déchets nucléaires reste plutôt vague.

2.11 Recommandations

Il serait très souhaitable que l'ANDRA s'engage à poursuivre un programme d'expérimentations géomécaniques in situ, bien au-delà de 2005, en supposant qu'un tel engagement soit légalement et administrativement possible.

Si cela est possible, il serait très souhaitable que l'ANDRA démontre de manière plus formelle les analogies entre Mont Terri et Bure. (Un effort similaire pourrait être entrepris entre Mol et Bure, mais il est possible que les résultats soient bien moins intéressants). Comme il est inéluctable que seulement un programme limité d'expériences in situ pourra être accompli fin 2005, il serait très souhaitable de faire un usage approfondi de tous les résultats, conclusions et observations de Mont Terri. Pour qu'une telle approche soit suffisamment crédible, il serait très utile d'établir explicitement la liste de tous les sites analogues à celui de Bure, c'est-à-dire en termes de propriétés géomécaniques, du comportement des déformations lors du creusement, etc. Il n'est pas sûr que l'ANDRA se soit penchée sur le programme japonais sur la mine de Tono.⁷⁷ Il est évident que trop se fier à des informations provenant d'autres sites est quelque peu risqué. Néanmoins il semblerait que les similarités entre Bure et Tono puissent justifier un examen, au moins superficiel, pour déterminer si un échange d'informations serait

⁷⁷ Par exemple Sato et al., 2000

utile. Un transfert de connaissances et de technologies du site de Tournemire à Bure serait, de la même manière, possible, notamment à cause de la présence d'un tunnel vieux de plus de cent ans et dans lequel de nombreuses études in situ ont déjà été réalisées.⁷⁸

Une recommandation de moindre importance, mais qui a déjà été faite par d'autres groupes d'évaluation,⁷⁹ se rapporte au système de mise en référence : une amélioration de celui-ci par l'ANDRA serait très utile aux personnes chargées d'une revue critique. Il est souvent difficile de localiser les informations techniques sur des sujets importants qui sont référencées dans divers documents. La difficulté d'accès à la documentation n'affaiblit pas nécessairement la crédibilité d'un argument, mais en réduit souvent l'impact, la force et le caractère percutant. Nombres de rapports et de publications de l'ANDRA sont écrits pour les initiés, qui seuls reconnaissent sans difficulté les acronymes, les abréviations, la structure de l'organisation, ou les divers participants au programme. Un programme de recherche sur les déchets nucléaires suscite toujours un intérêt très vif à l'extérieur, et justifierait une approche plus ouverte de la part de l'ANDRA dans la préparation de ses rapports. Un exemple typique est donné par le rapport de l'ANDRA *Résultats des travaux de reconnaissance géologique, Janvier 1994 – Mars 1996*⁸⁰ qui donne un résumé – et seulement un résumé – des propriétés géomécaniques. Le lecteur ne dispose d'aucune indication sur l'endroit où il pourrait obtenir plus d'informations sur la façon dont les essais ont été effectués, sur le nombre d'essais réalisés, sur les raisons qui mènent à la conclusion (importante) que la construction sera possible sans problèmes particuliers, etc. La même critique est valable pour le *Dossier 2001 Argile*.⁸¹

L'ANDRA pourrait (re ?) envisager si l'essai de scellement proposé est effectivement l'essai le plus important et le plus fondamental pouvant être réalisé, dans une période relativement courte. Cela est d'autant plus vrai que la nature de l'essai est plutôt artificielle. Cette nature artificielle soulève certainement d'autres questions sur sa représentativité pour le scellement définitif du site de stockage dans la réalité. La question se pose de savoir, notamment dans le cas de l'argilite, si la zone perturbée aura eu le temps de finir de se développer si un essai de scellement est programmé dans les mois suivant son creusement. Ou bien serait-il plus raisonnable d'attendre (des années ?) pour être en mesure d'évaluer de façon réaliste l'évolution dans le temps de la zone perturbée.

Afin de démontrer d'une façon convaincante que le scellement sera possible et fiable, un programme plus complet et plus réaliste de recherche sur le scellement serait souhaitable. Cela est d'autant plus vrai vue l'importance cruciale du rôle de la performance des scellements dans la performance du système géologique de confinement.⁸² Un tel programme comprendrait des études sur la meilleure approche pour traiter la question de l'EDZ, la façon de mettre en place les scellements et de les tester. Ce programme pourrait

⁷⁸ Par exemple Rejeb, 2000

⁷⁹ CNE, 2002, p. 17, p. 38 ; OECD-NEA, 2003, p. 55

⁸⁰ ANDRA Résultats, 1996

⁸¹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

⁸² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, Section VI.4.3.6

être réalisé dans une section de l'installation souterraine consacrée à l'essai de scellement. Un tel programme d'essai de scellement pourrait exiger un engagement sur de longues années. Il serait très souhaitable qu'un tel programme de scellement comprenne une recherche plus complète et plus détaillée sur l'influence des pratiques de construction sur le développement et les caractéristiques de l'EDZ, par exemple en comparant les caractéristiques de l'EDZ en fonction des méthodes de creusement de soutènement/armature. Il serait de même très utile d'entreprendre une recherche complémentaire sur les conséquences de la réactivation de la propagation de l'EDZ causée par la nécessité d'enlever le soutènement/armature. La même chose est vraie pour l'investigation des technologies qui pourraient être nécessaires pour prévenir ce genre de réactivation. Idéalement, une telle recherche devrait être conduite dans un endroit où le soutènement et l'EDZ ont été soumis aux effets combinés des charges mécanique, thermique, hydrologique, et chimique, par exemple dans un endroit (de la taille d'une pièce/à l'échelle d'une alvéole ?) où un essai chauffant prolongé aura été effectué. Évidemment pour mener à bien cet essai il faudrait compter plusieurs années (en supposant un minimum de quelques années pour un essai chauffant à grande échelle).

La recommandation de la Commission nationale d'évaluation d'effectuer des forages de reconnaissance déviés est très pertinente, notamment parce que les retards pris par les travaux de construction limiteront la superficie des installations souterraines et ce à une distance très voisine des puits d'accès. Les forages déviés fourniraient des informations d'une valeur inestimable tout particulièrement s'ils pouvaient traverser l'horizon du site de stockage et les formations sus et sous-jacentes. De plus cette information répondrait directement aux exigences de la Règle fondamentale de sécurité. Un des avantages les plus importants qui seraient retirés de ces forages serait d'obtenir des éléments d'information physiques directs sur l'homogénéité/l'hétérogénéité et la variabilité spatiale de la couche hôte et des formations encaissantes. L'ANDRA a procédé à ce type de forage en 2004⁸³ mais dans ce rapport nous n'avons pas pu consulter les données obtenues à partir de ces forages.

Les forages déviés auraient l'avantage supplémentaire important de fournir une quantité d'information beaucoup plus grande sur les aspects structuraux verticaux et subverticaux tout particulièrement les diaclases et les failles (même si la présence de ces dernières est peu probable, la confirmation physique directe de leur absence semblerait tout à fait valable). Tout système dense et important de diaclases verticales et/ou subverticales affectera vraisemblablement le comportement du massif rocheux, certainement dans le champ proche. Par conséquent ces systèmes auront des implications potentielles pour l'EDZ, la stabilité à court et long terme des cavités, et donc sur la réversibilité – sans compter les aspects évidents du confinement des déchets tels que des voies de circulation, le contournement des barrières absorbantes, etc. Les forages déviés pourraient être employés pour fournir des informations supplémentaires sur le champ de contrainte. Ils pourraient également fournir des informations sur la stabilité probable, et sur tous les problèmes potentiels de stabilité qui pourraient intervenir dans des excavations horizontales proches de l'horizontale.

⁸³ CNE 2004

Une autre alternative complémentaire, et même préférable, aux forages déviés consisterait à faire des forages horizontaux à partir de l'installation souterraine, dans la mesure où ces travaux peuvent être effectués sans interférer avec d'autres efforts de caractérisation se déroulant au même endroit. Les forages horizontaux, à l'instar des forages déviés, permettront de confirmer la présence ou l'absence d'aspects structuraux verticaux et/ou subverticaux et de les caractériser. Les forages horizontaux ont aussi l'avantage, par rapport aux forages déviés creusés à partir de la surface, de ne pas créer une possibilité d'ouverture de voies artificielles de circulation à travers tout l'horizon du site de stockage ou certaines sections.

Etant donné que l'ANDRA reconnaît que les réparations des dommages autour des cavités seront difficiles,⁸⁴ on peut se demander s'il ne serait pas préférable d'essayer de réduire au minimum de tels dommages par un contrôle des méthodes de construction utilisées, et si une attention suffisante a été prêtée aux moyens de réduire au minimum les dommages produits par les excavations et les travaux de construction. Les documents examinés ne permettent pas de savoir clairement comment de tels contrôles seront appliqués, par exemple, pendant le fonçage actuellement en cours des puits, ni quels contrôles pourraient être prévus, mis en place et surveillés pendant la construction du site de stockage. Néanmoins, nous constatons qu'un effort considérable est prévu pour caractériser l'EDZ dans les installations du laboratoire souterrain. Nous recommandons que l'ANDRA prenne plus explicitement en compte l'impact des pratiques en matière de construction sur la performance de sûreté du site de stockage, et envisage d'étudier l'impact des différentes options de méthode de construction dans le laboratoire souterrain, vraisemblablement après 2005. Les variables fondamentales qui décrivent l'interaction entre la roche et le soutènement laquelle détermine l'ampleur et l'importance des dommages potentiels sont bien définies.⁸⁵ On ne sait en revanche pas très bien si des études in situ sont prévues pour déterminer, éventuellement numériquement, ce qu'il est nécessaire de faire pour réduire les dommages à un niveau acceptable, ou si cette approche est même effectivement envisagée dans le cadre des investigations, de la conception, ou de la programmation du site de stockage.

Il semblerait souhaitable d'expliquer de façon plus approfondie comment les résultats des essais de dilatation proposés⁸⁶ seront analysés et interprétés vis-à-vis du comportement de l'argilite dans des conditions de contrainte très différentes. Bien que des essais de dilatation soient poursuivis dans le cadre d'un programme d'expérimentation plus vaste qui comprend une surveillance par extensomètres, par vitesse sismique, etc., il apparaît que ceux-ci soient les seuls essais visant à mesurer directement la rigidité de la masse rocheuse. Par conséquent, il est d'un intérêt tout particulier de s'assurer que les paramètres de rigidité (par exemples le module de Young?) sont reliés aux valeurs des paramètres qui seront utilisés pour la modélisation, ou peuvent être comparés à la rigidité déjà utilisée, c'est-à-dire la modélisation de l'étendue de l'EDZ.

⁸⁴ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

⁸⁵ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002, section 2.1.3, p. 13

⁸⁶ ANDRA Programme prévisionnel 1999, ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000

En ce qui concerne plus généralement la caractérisation mécanique de la roche, nous recommandons que l'ANDRA envisage de tester et modéliser plus explicitement les propriétés et le comportement des discontinuités, par exemple des plans de stratification et des diaclases, dans la roche hôte (et aussi, mais secondairement, dans les formations sus et sous-jacentes). Il est bien connu et largement admis que les discontinuités ont souvent une influence dominante sur le comportement de la masse rocheuse.⁸⁷ Bien qu'il ne soit pas immédiatement évident de savoir si oui ou non, et dans quelle mesure, les discontinuités peuvent affecter ou dominer le comportement (thermo -, hydro-, chimio-) mécanique, celles-ci ne peuvent certainement pas être ignorées. L'intégration de leurs effets dans un comportement d'ensemble moyen du massif rocheux est une simplification qui peut être acceptable pour certaines applications,⁸⁸ mais pour une structure aussi critique qu'un site de stockage il serait de loin préférable de la démontrer plutôt que de la supposer

L'ANDRA reconnaît⁸⁹ que pour certains types d'essais en laboratoire le nombre d'essais réalisés peut être trop limité pour être statistiquement significatif. Nous recommandons que des essais supplémentaires, là où ils font défaut, soient réalisés aussitôt que possible, par exemple dès que des spécimens pourront être obtenus à partir des puits et/ou de la niche. Un tel essai complémentaire en laboratoire apportera non seulement une meilleure confiance statistique dans les données, mais fournira aussi des données supplémentaires pour traiter les questions de variabilité spatiale. Cet essai peut vraisemblablement être mené avec une interférence minimale et même inexistante avec l'essai souterrain in situ.

Il est plutôt surprenant de constater que dans le critère de défaillance de Hoek et Brown, le paramètre s , est choisi égal à 1 à la fin de la discussion sur la détermination en laboratoire des propriétés de la roche. Selon le tableau 4.4-0.1, $s = 1$ est employé pour la conception souterraine. Ceci semble être une approche plutôt non pénalisante⁹⁰ et mérite donc certainement d'en poursuivre l'élaboration et la justification. Évidemment, dans une certaine mesure, ce choix du paramètre s est compensé par la valeur réduite proposée pour la force compressive uniaxiale. Mais cette approche n'est pas très courante, et il n'est pas du tout sûr qu'elle soit suffisamment majorante, ou réaliste. Nous admettons que le choix d'une résistance à long terme ou d'une réduction de celle-ci est une question qui a toujours posé problème,⁹¹ et fait l'objet de nombreuses incertitudes.⁹²

On peut avancer l'argument que ces questions préliminaires de conception, ou que ces aspects technologiques d'implémentation sont vraisemblablement des paramètres de conception critiques même pour le laboratoire in situ. Il sera donc nécessaire de les évaluer dans tous les creusements souterrains, par exemple les puits et les galeries, dans le cadre de l'évaluation de la faisabilité du site. Les questions suivantes se posent : ces paramètres sont-ils réalistes en terme de leur utilisation pour décrire le comportement de

⁸⁷ Par exemple CFMR, 2000, section 4.1, Hudson et Harrison, 1997, p. 113

⁸⁸ Par exemple CFMR, 2000, section 5.8

⁸⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, section IV.2.4

⁹⁰ Comparer par ex. avec Hoek et al., 1995, tableau 8.4

⁹¹ Par exemple Hoek et Brown, 1980, p. 150

⁹² Par exemple Fairhurst, 1999, pp 9-10

la masse rocheuse in situ ? Et, par conséquent, sont-ils pertinents pour l'évaluation de l'étendue, de la géométrie et du développement mécanique de l'EDZ ? Une confirmation sur le terrain, ou plus vraisemblablement un ajustement des paramètres basé sur des observations sur le terrain, constitueraient un exercice inestimable pour établir la confiance. Par contre, si moins d'ajustements sont nécessaires, et si la sélection initiale de la valeur du paramètre s'avère plus pertinente, l'approche en sera d'autant plus crédible, tout en tenant compte qu'en matière d'ingénierie géotechnique basée sur des expériences in situ des ajustements sont quasiment toujours nécessaires.⁹³ Le choix de valeurs éventuellement non pénalisantes de résistance pour la conception est particulièrement préoccupante étant donnée l'exigence de stabilité à long terme pour cette structure, et la nécessité reconnue de réduire au minimum la taille de l'EDZ, et l'intensité de tout dommage qu'elle pourrait subir. Les observations approfondies in situ prévues dans le laboratoire souterrain permettront vraisemblablement une meilleure évaluation de quelles sont les "meilleures" valeurs de paramètres effectives qui peuvent, et seront employées pour de tels exercices de calibrage.

2.12 References

| | |
|--------------------------------------|---|
| AkEnd, 2002 | AkEnd, 2002, <i>Site Selection Procedures for Repository Sites, Recommendations of the AkEnd – Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites</i> [Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte] established by (German) Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)], printed by W & S Druck GmbH, Köln. |
| Alheid et al., 1999 | Alheid, H.-J., M. Knecht, J.-Y. Boisson, F. Homand-Etienne & S. Pepa, Comparison of in-situ hydraulic and seismic measurements in the excavation damaged zone of underground drifts, <i>Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics</i> (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 1263-6. |
| ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000 | ANDRA, 1999f, <i>Cahier des charges de réalisation de l'experimentation : E-GIS, Caractérisation géomécanique in-situ des argilites du Callovo-Oxfordien, Objectifs scientifiques et résultats attendus</i> . Identification: C CC AGEM 99-083, Émetteur: DS/GM. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 01/12/1999. Rév. A: 30/10/00. |
| ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001 | ANDRA, 2000, <i>Cahier des charges de réalisation de l'expérimentation : E-REG, Réponse hydro-mécanique de l'argilite au creusement d'une galerie</i> , Identification: C CC AGEM 00-060/B. Émetteur: DS/GM. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 23/10/2000. Rév. B: 15/05/2001. |

⁹³ Par exemple au Canada, Chandler, 1999 ; aux Etats-Unis Blair, et al.,2001

| | |
|---|--|
| ANDRA Cahier des charges KEY, 2002 | ANDRA, 2002, <i>Cahier des charges de réalisation de l'expérimentation : KEY, Maîtrise de l'endommagement au droit d'un serrement de galerie</i> , Identification: C CC ASMG 02-012, Émetteur: DS/MG. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 02/05/2002. Rév. B: 20/06/2002. |
| ANDRA Cahier des charges REP, 2001 | ANDRA, 1999d, <i>Cahier des charges de réalisation de l'expérimentation REP, Réponse mécanique de l'argilite au creusement du puits d'accès</i> , Objectifs scientifiques et résultats attendus. Identification: C CC AGEM 99-049, Émetteur: DS/MG. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 25/06/1999. Rév. C: 04/12/01 |
| ANDRA Cahier des charges SUG, 2001 | ANDRA, 1999e, <i>Cahier des charges de réalisation du suivi scientifique du creusement des galeries du laboratoire souterrain : SUG, Objectifs scientifiques et résultats attendus</i> . Identification: C CC ADS 00-001, Émetteur: DS, [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 17/12/99. Rév. B: 12/11/2001. |
| ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B | ANDRA, 2001, <i>Dossier 2001 Argile, sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde : Rapport de Synthèse – Partie B</i> . [Châtenay-Malabry?]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre. |
| ANDRA Ovalisation, 1997 | ANDRA, 1997. Expertise relative à l'ovalisation de forages de la zone d'étude de l'est de la France. Identification: B RP 0ANT 96.128. Date d'origine. Juillet 1997. Rév. B: 07/1997. |
| ANDRA Programme prévisionnel 1999 | ANDRA, 1999c, <i>Programme prévisionnel de recherche en laboratoire souterrain : Site de Meuse/Haute Marne, Présentation generale, Description détaillée des expérimentations envisagées</i> . Identification: CRP ADS 99-003, Émetteur: DS/SR. Bure: Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 03/02/99 |
| ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001 | ANDRA, 1999a, <i>Référentiel Géologique du Site de Meuse/Haute-Marne, Tome 3, Les connaissances à l'échelle du secteur</i> , Identification: A RP ADS 99-005/B. Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 18/07/2001 |
| ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001 | ANDRA, 1999g, <i>Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 4, Le Callovo-Oxfordien</i> , Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 16/07/2001. |
| ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001 | ANDRA, 1999b, <i>Référentiel Géologique du Site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, Etat d'avancement de la modélisation</i> . Identification: A RP ADS 99-005, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B; 03/09/2001 |

| | |
|---------------------------|---|
| ANDRA Résultats, 1996a | ANDRA, 1996a, <i>Laboratoires souterrains d'études géologiques : Résultats des travaux de reconnaissance géologique, Janvier 1994 – Mars 1996</i> . Cover title: Recherches préliminaires à l'implantation des laboratoires de recherche souterrains : Bilan des travaux. Châtenay-Malabry : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 9 avril 1996 |
| ANDRA, 2002-2005 | ANDRA, 2002-2005, <i>Projet HAVL-Argile Projet Programme Scientifique 2002-2005</i> . |
| ASTM, 2000 | ASTM D 4644 – 87 (Reapproved 1998), 2000, Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks, <i>Annual Book of ASTM Standards 2000</i> , ASTM, West Conshohocken, PA, USA. Section 4, Construction, Volume 04.08, pp. 778-780 |
| Bemer et al., 2002 | Bemer, E., P. Longuemare, O. Vincke, 2002, Poroelastic parameters of Meuse/Haute-Marne argillites: effect of loading and saturation states, pp. 199-200, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Blair et al, 2001 | Blair, Stephen C., Steven R. Carlson, & Jeffery L. Wagoner, 2001, Distinct element modeling of the drift scale test, pp. 527-531, <i>Rock Mechanics in the National Interest</i> , Vol. 1, Derek Elsworth, John P. Tinucci, and Keith A. Heasley, eds., <i>Proceedings of the 38th U.S. Rock Mechanics Symposium, DC Rocks 2001</i> , Washington, D.C., USA, 7-10 July 2001. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). |
| Boyle et Rowe, 1998 | Boyle, William and Patrick Rowe, 1998, Rock mechanics of the proposed United States nuclear waste repository, pp. 65-90, <i>Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories</i> , Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999. |
| Brown, 1981 | Brown, E.T., Editor, 1981, Suggested method for determination of the slake-durability index, pp. 92-94, <i>Rock Characterization Testing & Monitoring</i> , ISRM Suggested Methods, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, Oxford; New York. |
| CFMR, 2000 | CFMR, 2000, <i>Manuel de Mécanique des Roches</i> , Tome 1: Fondaments, par le Comité Français de Mécanique des Roches, Coordonné par Françoise Homand et Pierre Duffaut. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris. |
| Chandler, 1999 | Chandler, Neil A., 1999, Geotechnical and rock mechanics research for nuclear fuel waste management in Canada, pp. 91 – 115, <i>Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories</i> , Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999. |

| | |
|---------------------------------|---|
| CNE «réversibilité», 1998 | CNE, 1998, <i>Réflexions sur la réversibilité des stockages</i> , Commission Nationale d’Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. On the Web at http://www.ladocfrancaise.gouv.fr/BRP/004001166/0000.htm . |
| CNE, 1999 | CNE, 1999, <i>Rapport d’Evaluation N° 5</i> , Commission Nationale d’Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. |
| CNE, 2001 | CNE, 2001, <i>Rapport d’Evaluation N° 7</i> , Commission Nationale d’Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. On the Web at http://www.ladocfrancaise.gouv.fr/brp/notices/014000485.shtml . |
| CNE, 2002 | CNE, 2002, <i>Rapport d’Evaluation N° 8</i> , Commission Nationale d’Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Septembre. |
| CNE, 2003 | CNE, 2003, <i>Rapport d’Evaluation N° 9</i> , Commission Nationale d’Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. |
| CNE, 2004 | CNE, 2004, <i>Rapport d’Evaluation N° 10</i> , Commission Nationale d’Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. |
| Conil-Aublivé et al., 2002 | Conil-Aublivé, Nathalie, Irini Djeran-Maigre, Richard Cabrillac, Kun Su, 2002, Poroplastic damage model for geomaterial, pp. 193-194, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Cosenza et al., 2002 | Cosenza, Ph., M. Ghoreychi, G. Vasseur, S. Violette, 2002, An indirect approach to predict Biot’s coefficient of argillaceous rocks, pp. 197-198, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| De Marsily et al., 2002 | de Marsily, Ghislain, Julio Gonçalves, Sophie Violette, Maria-Clara Castro, 2002, Migration mechanisms of radionuclides from a clay repository toward adjacent aquifers and the surface, <i>C.R. Physique 3</i> , 945-959. |
| Dereeper et Volckaert, 2002 | Dereeper, Bernard et Volckaert, Geert, 2002, The Reseal Project: a large scale shaft sealing demonstration test, pp. 269-270, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Fairhurst, 1999 | Fairhurst, Charles, 1999, Rock mechanics and nuclear waste repositories, Keynote paper, pp. 1 – 43, <i>Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories</i> , Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999. |

| | |
|---------------------------|---|
| Fleureau et al., 2002 | Fleureau, Jean-Marie, Arézou Modaressi, Muzahim Al-Mukhtar, Luc Deroo, Odile Ozanam, 2002, Evaluation of crushed clay rocks as a filling material for wastes storage galleries, pp. 179-180, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Gasc-Barbier et al., 1999 | Gasc-Barbier, M., M. Ghoreychi, and D. Tessier, 1999, Comportement mécanique de roches argileuses profondes: incidence de la texture, <i>Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics</i> (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 595 – 600. |
| GdR FORPRO, 2002 | GdR FORPRO, 2002, <i>Observatoire interdisciplinaire sur l'EDZ: Programme des expérimentations du GdR FORPRO dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne et annexes 1 et 2 (synthèse des demandes en ouvrages et en équipements)</i> , Centre national de la recherche scientifique ; ANDRA, Version du 24 juin 2002. |
| Goodman, 1989 | Goodman, Richard E., 1989, <i>Introduction to Rock Mechanics</i> , 2 nd ed. Wiley, New York. |
| Gratier et al., 2002 | Gratier, J.P., L. Jenatton, R. Guiguet, 2002, Long-term behavior of the natural barrier in the Bure site: creep, swelling and pressure-solution studied by indentor techniques, pp. 93-94, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Hakami et Olofsson, 2002 | Hakami, Eva, and Stig-Olof Olofsson, 2002, <i>Numerical modelling of fracture displacements due to thermal load from a KBS-3 repository</i> , Technical Report TR-02-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, January. |
| Heitz, et al., 1999 | Heitz, J.-F., D. Fourmaintraux, and N. Hoteit, 1999, Ovalisations de forages dans une formation argiliteuse: analyse mécanique en retour et relations avec les caractéristiques physiques, <i>Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics</i> (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 1095 – 1100. |
| Hoek et al., 1995 | Hoek, E., P.K. Kaiser, and W.F. Bawden, 1995, <i>Support of Underground Excavations in Hard Rock</i> , Balkema, Rotterdam; Brookfield. |
| Hoek et Brown, 1980 | Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, <i>Underground Excavations in Rock</i> , Institution of Mining and Metallurgy, London. |
| Homand and Cathelieneau | Homand, F. and M. Cathelieneau, date unknown (1998?), Etude sur l'évolution des fissures produites par un chargement mécanique et/ou thermique des siltites et des argillites, LAEGO – Rapport ANDRA n° D RP 0ENG 98-013. |

| | |
|-----------------------------|---|
| Hoorelbeke et al., 2003 | Hoorelbeke, Jean-Michel, Stefan Mayer and Frédéric Plas, 2003, Managing design requirements of the French HLLW programme in clay media, pp. 43-49, <i>Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Workshop Proceedings</i> , Oxford, United Kingdom, 25-27 September 2002, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France, 2003. |
| Hoteit et al., 1998 | Hoteit, N., O. Ozanam, and K. Su, 1998, Geomechanical investigation of an argillaceous formation in the east of France, pp. 185 – 203, <i>Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories</i> , Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999. |
| Hoxha et al., 2002 | Hoxha, Dashnor, Albert Giraud, Françoise Homand, Clement Chavant, 2002, A poromechanical model for M/H-M argillite, pp. 51-52, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Hudson et Harrison, 1997 | Hudson, John A. and John P. Harrison, 1997, <i>Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles</i> , Pergamon, Amsterdam ; New York. |
| IAEA, 2003 | IAEA, 2003, <i>Geological Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Requirements DS 154</i> , IAEA Safety Standards Series, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2003-04-01. On the Web at http://www.iaea.or.at/ns/committees/drafts/ds154.pdf . |
| Kalbantner et Sjöblom, 2000 | Kalbantner, Pal and Rolf Sjöblom, 2000, <i>Techniques For Freeing Deposited Canisters</i> , Technical Report TR-00-15, SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden. |
| Kolmayer et al., 2002 | Kolmayer, Philippe, Roméo Fernandes, C. Chavant, 2002, Numerical implementation of a new rheological law for argillites, pp. 195-196, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Lashkaripour, 2002 | Lashkaripour, G.R., 2002, Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> , 61: 73-77. |
| Lecampion et al., 2002 | Lecampion, B., A. Constantinescu and D. Nguyen Minh, 2002, Parameter identification for lined tunnels in a viscoplastic medium, <i>International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics</i> , Vol. 26, pp. 1191-1211. |
| Malinsky et al., 2002 | Malinsky, L., S. Chancole, F. Coste, 2002, Hydromechanical testing of an argillaceous rock, Experimental set up and testing procedure, pp. 201-202, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |

| | |
|--------------------------|---|
| Martin et Lanyon, 2003 | Martin, C.D., and G.W. Lanyon, 2003, Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland, <i>International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences</i> , Vol. 40, pp. 1077-1088. |
| Milnes, 2002 | Milnes, Alan Geoffrey, 2002, Swedish deep repository siting programme: Guide to the documentation of 25 years of geoscientific research (1976-2000) , Technical Report TR-02-18, SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, March. |
| Miura et al., 2002 | Miura, Kzuhiko, Nasser Hoteit, Kun Su, Odile Ozanam, 2002, Comparison of the two long-term creep modes of rock, pp. 95-96, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Nguyen Minh et al., 1999 | Nguyen Minh, D., J. Bergues, and N. Hoteit, 1999, Détermination du comportement mécanique des roches argileuses, <i>Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mécanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics</i> (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 645 – 650. |
| OECD-NEA, 2003 | OECD, 2003, <i>The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, An International Peer Review of the "Dossier 2001 Argile,"</i> Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, France. |
| Pusch, 2001 | Pusch, Roland, 2001, <i>The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Materials and techniques</i> , Technical Report TR-02-12, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Stockholm, Sweden, December. |
| Pusch, 2002 | Pusch, Roland, 2002, <i>The Buffer and Backfill Handbook, Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods</i> , Technical Report TR-02-20, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Stockholm, Sweden, April. |
| Règle N° III.2.f | Règle N° III.2.f (10 juin 1991) <i>Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs. Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides.</i> Règle N° III.2.f (10 juin 1991) <i>Tome III: Production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides.</i> In Règles Fondamentales de Sûreté Relatives aux Installations Nucléaires de Base Autres que Réacteurs, pp. 470-480. |
| Rejeb, 2000 | Rejeb, Amel, 2000, Mechanical characterisation of the argillaceous Tournemire site (France), IN <i>Site Characterisation Practice: Proceedings of the International Conference on Rock Engineering Techniques for Site Characterisation</i> , Bangalore, India, December 6-8, 1999, edited by P.C. Jha an R.N. Gupta. Rotterdam ; Brookfield, VT: Balkema, 2000. pages 45-50/ |

| | |
|--------------------------|---|
| Sato et al., 2000 | Sato, T., T. Kikuchi, K. Sugihara, 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, pp. 105-116, <i>Engineering Geological Advances in Japan for the New Millennium</i> , edited by Yuji Kanaori, Kazuhiro Tanaka and Masahiro Chigira, Elsevier, Amsterdam ; New York. |
| SKB, 2001 | SKB, 2001, <i>RD&D-Programme 2001</i> , Technical Report TR-01-30, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, September. |
| SKB, 2002 | SKB, 2002, <i>Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 2001</i> , Technical Report TR-02-10, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, September. |
| SKB, 2003 | SKB, 2003, <i>Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 2002</i> , Technical Report TR-03-10, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, June. |
| Sugihara et al., 1999 | Sugihara, Kozo, Hiroya Matsui, and Toshinori Sato, 1999, In-situ experiments on rock stress condition and excavation disturbance in JNC's geoscientific research program in Japan, a rock mechanical basis of Underground Research Laboratory project, pp. 159-183, <i>Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories</i> , Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999. |
| Valès et al., 2002 | Valès, F., P. Bérest, H. Gharbi, 2002, Interaction between creep, swelling and pressure-solution during indentation tests, p. 207, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Vaunat et al., 2002 | Vaunat, J., A. Gens, and E.E. Alonso, 2002, A Constitutive Model for Eastern Argillite, pp. 49-50, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |
| Wileveau, 2004 | Wileveau, Y., 2004, Determination of in situ stress at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, Northeastern France, <i>Geophysical Research Abstracts</i> , Vol. 6, 05876, 2004 Sref-ID:1607-7962/gra/EGU04-A-05876, 2004. On the Web at http://www.cosis.net/abstracts/EGU04/05876/EGU04-J-05876.pdf . |
| Wright et al., 2001 | Wright, H., J.-M. le Cléac'h and M. Deveughèle, 2001, Altération et rupture d'échantillons d'argilite lors de sollicitations thermomécaniques en conditions humides contrôlées, <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> , 60:59-67. |
| Zhang et Rothfuchs, 2002 | Zhang, C.L. and T. Rothfuchs, 2002, Experimental Study of Hydromechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillites, pp. 53-5, <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France. |

